

УДК 622.831.2:539.422.3

Л.М.Захарова

Інститут фізики гірничих процесів НАН України

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР Й ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПАТТЕРНІВ

Захарова Л.М. Розробка алгоритму ідентифікації дисипативних структур й визначення їх паттернів. Обґрунтована методологія ідентифікації дисипативних структур, що виникають у процесі необоротних зрушень масиву гірських порід навколо гірничих підземних виробок. Розроблена методика кластеризації паттернів дисипативних структур з урахуванням невизначеності й варіації гірничо-геологічних й гірничотехнічних умов розробки родовищ корисних копалин

Ключові слова: необоротні зрушення, дисипативні структури, кластеризація.

Захарова Л.М. Разработка алгоритма идентификации диссипативных структур и определение их паттернов. Обоснована методология идентификации диссипативных структур, возникающих в процессе необратимых сдвижений массива горных пород вокруг горных подземных выработок. Разработана методика кластеризации паттернов диссипативных структур с учетом неопределенности и вариации горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: необратимые сдвижения, диссипативные структуры, кластеризация.

Zakharova L.M. Development of an algorithm for dissipative structures identification and determination of their patterns. The objective of this paper is to develop a methodology for dissipative structures identification and determination of their position in space and in time. We used K-mean clustering to define coordinates of the cluster centers and Voronoi diagrams for positioning their boundaries. Boltzmann formula has been used for identification of the optimal moment when clustering process should be terminated. We found that reliable identification of the dissipative structures in space and in time can be done by monitoring of incremental rock mass displacement in the diapason from 2 to 10 standard error of measurement. Coordinates of the cluster centers can be positioned with variogram method using K-means technique and entropy minimization principle. It was the first time when cluster boundaries and their number was defined for dissipative structure, which spontaneously occur during irreversible ground movement in uncertain geologic environment. Practical implication of this methodology facilitates safety maintenance during underground deposits exploitation.

Key words: irreversible ground movement, dissipative structures, clustering.

Вступ. Проблема розпізнавання образів на сьогодні стосується вельми широкого кола галузей знань: від розпізнавання мовлення до геоінформаційних технологій і робототехніки [1,2]. Однією з важливих ланок процесу розпізнавання є кластеризація певних паттернів, які зазвичай змінюються як у просторі так і в часі [3]. Найбільш складна ситуація виникає у випадках, коли у процесі розпізнавання необхідно враховувати особливості об'єкта та його еволюцію. Наприклад під час необоротних зрушень масиву гірських порід навколо підземних виробок спонтанно виникають дисипативні структури, паттерни яких еволюціонують так, щоб накопичувати максимальний об'єм степеней вільності [4,5]. Причому розмір дисипативних структур та їх паттерни змінюються у часі нелінійно, що ускладнює процес їх розпізнавання. Додатково процес еволюціонування дисипативних структур відбувається на тлі шумів, що породжуються випадковими флуктуаціями фізико-механічних властивостей порід, невизначеністю граничних умов, а також параметрів технологій розробки родовищ корисних копалин, Тому невирішеною частиною проблеми залишається не тільки знаходження положення границь кластерів у просторі, але й визначення оптимальних параметрів методики кластеризації, зокрема моментів, у які необхідно виконувати зйомку дисипативних структур [5].

Отже метою даної статті є розробка алгоритму ідентифікації дисипативних структур у масиві гірських порід під час їх необоротних зрушень навколо підземних виробок й визначення паттернів дисипативних структур у процесі їх еволюції.

Викладення основного матеріалу. Графік (а) рис. 1 показує, що збільшення похибки вимірювань зменшує ймовірність виявлення необоротних інкрементальних зрушень. Низька точність фіксації координат міток призведе до втрати окремих або самих малих, проте закономірних інкрементів переміщень міток та геодезичних знаків. Ці інкременти є основним термодинамічним представником (поток) необоротного процесу, який може породжувати дисипативні структури. Часовий інтервал між послідовними сесіями моніторингу є наступним вирішальним параметром поруч зі щільністю розміщення міток на ділянці, де виконуються інструментальні спостереження. З одного боку збільшення вказаного інтервалу впливає на достовірність виявлення інкрементів зрушень неоднозначно. Спочатку збільшення часового інтервалу сприяє підвищенню достовірності результатів моніторингу, оскільки зменшується

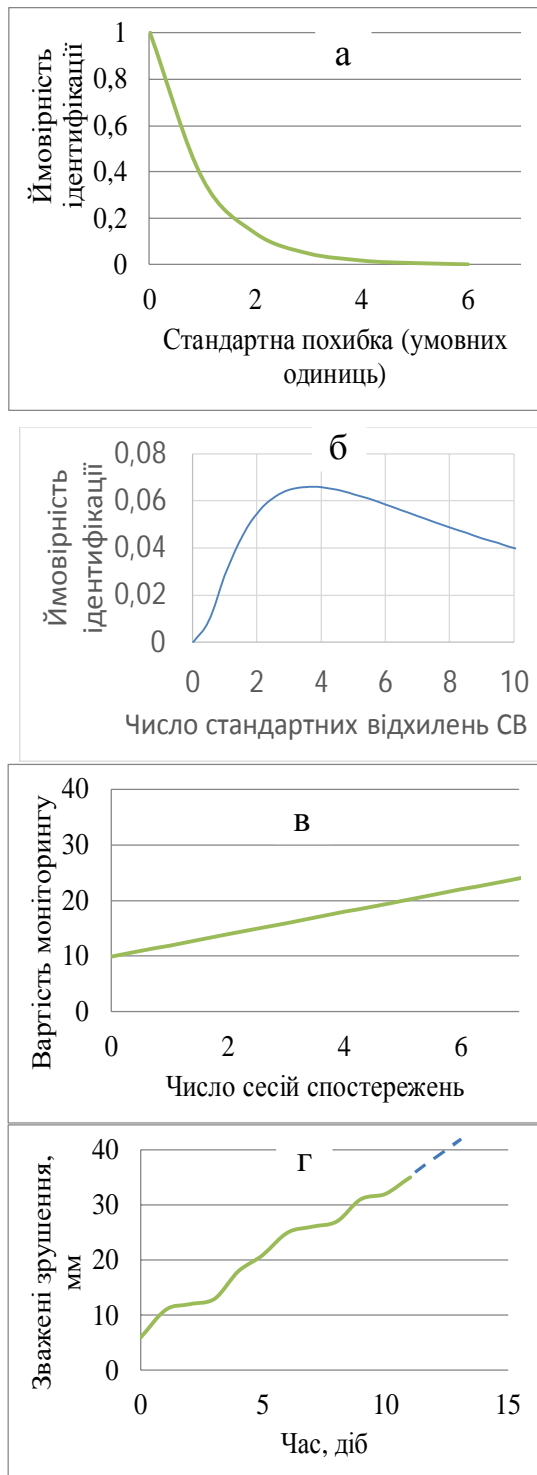


Рис. 1. Графіки, що ілюструють процес вибору ідентифікації дисипативних структур: а, б, в і г – відповідно вибір стандартної похибки вимірювань, числа стандартних відхилень, числа сесій моніторингу й його часового інтервалу

кількість хибних інкрементальних зрушень, які зафіксовані як випадкова похибка вимірювань, а не закономірне необоротне зрушення, яке відбулось у реальності (фрагмент б рис. 1). З другого боку подальше збільшення часового інтервалу призведе до зростання середньої величини інкрементальних зміщень, що викликає втрату цінної інформації й тягне за собою спрощення загальної картини необоротних зрушень. Це безпосередньо погіршить достовірність виявлення дисипативних структур.

Варто також мати на увазі економічну сторону процесу моніторингу координат міток. Вартість моніторингу зростає як зі збільшенням щільності міток у просторі, так й зі зменшенням інтервалу між послідовними сесіями моніторингу. На фрагменті (в) точка перетину осі ординат з графіком вартості характеризує одноразові початкові витрати на обладнання спостережної мережі міток й геодезичних знаків. Чим більше щільність геодезичних знаків (тобто менше середня відстань між ними), тим вища вартість побудови геодезичної мережі. Зрозуміло також, що зі скороченням часового інтервалу між послідовними сесіями моніторингу координат міток збільшується число сесій, що прямо пропорційно підвищує вартість моніторингу (поточні витрати).

Отже проблема обґрунтування точності вимірювання, щільності установки а також часового інтервалу між послідовними сесіями є складною оптимізаційною задачею, яка повинна вирішуватись окремо. При виконанні даної роботи раціональні параметри моніторингу обґрунтовані експериментальним шляхом. Перш за все необхідно визначитись, якого типу структури необхідно ідентифікувати: мікро-, макро-, чи мега- згідно класифікації ІГТМ. У цій роботі основна увага була присвячена виявленню дисипативних структур у макро-масштабі, який є співрозмірним з габаритами гірничих виробок, або розмірами локальних зсувів ґрунтів на похилій земній поверхні.

Перш за все необхідно вибрати раціональну відстань між мітками або реперами, мережа яких буде покривати площу, яка охоплена процесом необоротних зрушень масиву гірських порід, або ґрунтів. Ця відстань визначається ключовим структурним елементом, який являє собою окремий блок породи або ґрунту. Практика свідчить про те, що для адекватного відображення поведінки дискретного або блочного середовища достатньо об'єму, розміри якого лише на порядок перевищують характерні розміри породних блоків як складових масиву [6]. Отже типова відстань між геодезичними знаками може знаходитись у межах від 2 до 10 характерних

розмірів блоків. У випадку мінімальної відстані моніторинг здатен уловлювати особливості необоротного руху кожного з блоків. Зі зростанням середньої відстані, вираженої у величинах характерного розміру блочності інформація про дисипативні структури буде ставати більш

узагальненою і деякі деталі буде втрачено, проте в інтервалі відстаней до 10 характерних розмірів блоків надійна ідентифікація дисипативних структур гарантована.

Мінімізація вартості моніторингу еволюції дисипативних структур досягається методом вибірки групи ділянок масиву, які представляють на поточний момент найбільший інтерес. Подальша оптимізація плану моніторингу досягається елементами управління проектами а також застосування рівнів ризику з урахуванням невизначеності подальшого розвитку небезпечних процесів. Наприклад задаючи певний рівень ризику, можна обмежитись лише тими ділянками, на яких на поточний момент розвиваються процеси, які являють максимальний ризик катастрофи й планувати частоту спостережень саме виходячи з цих процесів [5].

До речі невизначеність процесів руйнування й необоротного деформування та зрушення порід і твердого тіла взагалі є його фундаментальною властивістю. Тому вибір часового інтервалу моніторингу необхідно планувати згідно поточним темпам розвитку необоротних процесів (зрушень) з урахуванням їх невизначеності (фрагмент (г) рис. 1, де прогноз показаний пунктиром.

У даній роботі для виявлення дисипативних структур застосовуються сучасні потужні методи варіаграмного аналізу [7] а також метод К-середніх [8,9]. Варіограма являє собою статистичний момент другого порядку, який широко застосовується у геостатистиці для моделювання й аналізу просторової кореляції.

Варіограма $2\gamma(x, x+h)$ для значень просторової змінної $Z(x)$ у двох точках x і $x+h$, які розділені вектором h , визначається варіацією різниці значень змінної у вказаних точках:

$$2\gamma(x, x+h) = E[(Z(x) - \mu(x)) - (Z(x+h) - \mu(x+h))]^2 \quad (1)$$

На рис. 2 наведено вид варіограми. Існує кілька базових типів варіограм. У даному випадку варіограма схожа на експоненціальний тип. За формою цієї варіограми можна зробити кілька важливих висновків. Оскільки крива, що апроксимує варіограму має тенденцію пересікати вісь ординат, усі внутрішні закономірності варіабельності статистичних даних (а в даному випадку довжин векторів інкрементальних зрушень і їх напрямків) варіограмний аналіз уловив.

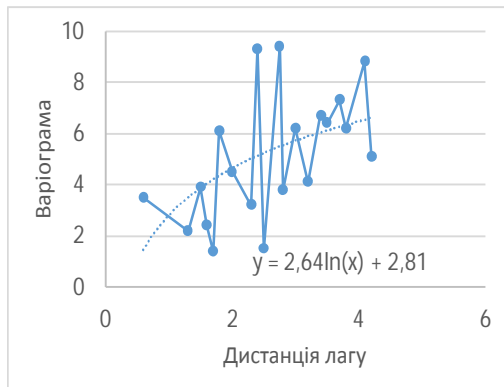


Рис. 2. Приклад варіограми

Варіограма може мати поріг, проте у даному випадку важливо, що параметри більш близьких векторів корелюють між собою краще, ніж віддалених, що помітно по зростанню середніх значень варіограми з віддаленням (збільшенням довжини вектору h) між парами точок. До того ж суттєві коливання значень варіограми відносно кривої, яка її інтерполірує свідчить про наявність певних структур у межах групи векторів. Це означає високу ймовірність того, що вказана група векторів складається з кластерів, які характеризують різні дисипативні структури.

Для ідентифікації вказаних структур застосовано метод К-середніх. Ідея методу заснована на одночасній мінімізації варіації відстаней між векторами всередині кластерів і максимізації розкиду відстаней між центрами

тяжіння кластерів. Зауважимо, що відстані між векторами визначаються у Евклідовому просторі, який має довільну розмірність. Задача класифікації випадкових величин, зокрема для виявлення дисипативних структур серед векторної мозаїки інкрементальних необоротних зміщень масиву гірських порід, не має однозначного рішення. Тому кількість можливих кластерів змінювалося від 3-4 і далі. Процес класифікації контролювався динамікою дисперсій або середньоквадратичних відхилень відстаней від центрів кластерів до спільного центру. Важливо підкреслити, що для візуалізації кластерної мозаїки використовувалося інтерпольоване поле зсувів ґрунту, тоді як у процесі кластерного аналізу залучалися тільки фактичні зміни координат реперів, установлених на експериментальній ділянці по мітках.

У таблиці 1 показані результати обчислення відстаней між кластерами у Евклідовому просторі на етапі, коли їх було сім штук. У міру збільшення числа кластерів довжина і орієнтація векторів зсувів їх центрів змінювалася. Деякі вектори демонстрували відносну стабільність, тоді як ряд векторів розпадалися на складові, що свідчило про різноманіття кластерної мозаїки і необхідність подальшого ітераційного процесу вичленування кластерів.

У більшості випадків на початковому етапі кластеризації всі вектори необоротних зрушень міняли свої параметри істотно. Так у процесі збільшення числа векторів з 5 до 7 відносно

стабільним залишився лише вектор. Решта векторів змінили або довжину, або поміняли як довжину, так і напрямок.

Таблиця 1.

Відстань між кластерами, м² \ м *

| № кластеру | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 1 | 0,0 | 2625,8 | 7398,7 | 1921,9 | 3231,4 | 8435,1 | 7990,9 |
| 2 | 51,2 | 0,0 | 2983,1 | 2990,7 | 3069,5 | 1672,4 | 2321,8 |
| 3 | 86,0 | 54,6 | 0,0 | 2976,9 | 12058,5 | 2567,0 | 8194,8 |
| 4 | 43,8 | 54,7 | 54,6 | 0,0 | 8432,0 | 7034,2 | 10574,4 |
| 5 | 56,8 | 55,4 | 109,8 | 91,8 | 0,0 | 7337,3 | 3031,1 |
| 6 | 91,8 | 40,9 | 50,7 | 83,9 | 85,7 | 0,0 | 2094,6 |
| 7 | 89,4 | 48,2 | 90,5 | 102,8 | 55,1 | 45,8 | 0,0 |

* Вище діагоналі вказані квадрати відстаней, нижче – відстані

Процес насичення дисперсій відстаней між кластерами векторів переміщень порід і всередині кластерів наочно ілюструється графіками на рис. 3. На цьому рисунку показана дисперсія відстаней між векторами зрушень всередині кластерів і між центрами окремих кластерів. При цьому розкид відстаней вказано окремо за компонентами зрушень уздовж осей X і Y. Підкреслимо, що кластеризація векторів здійснювалася окремо по їх компонентам, оскільки важлива не тільки довжина векторів, а й їх напрямок

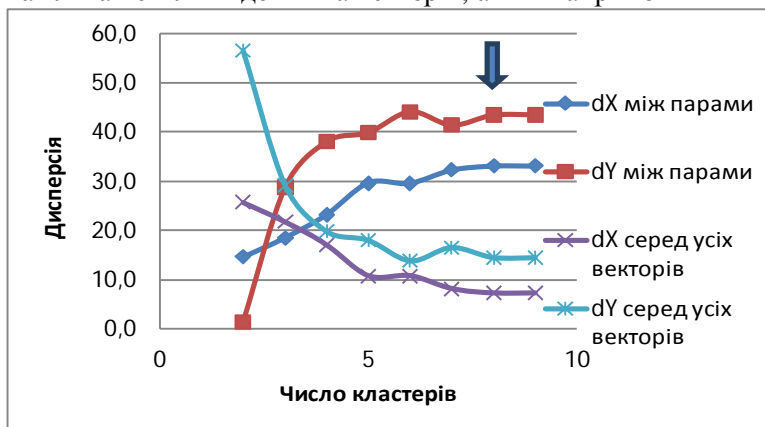


Рис. 3. Стабілізація дисперсії від кількості кластерів

Як видно з графіків, при збільшенні числа кластерів до 9 спостерігається стабілізація відповідних дисперсій по обидвом компонентам зрушень точок земної поверхні. Разом з тим подальше продовження процесу кластеризації показало, що по мірі зростання числа кластерів алгоритм К-середніх уловлює все тонкіше різницю між кластерами [5]. Очевидно, що у певний момент часу алгоритм почне класифікувати векторну мозаїку за ознаками, які мають не фізичну, а стохастичну

природу. Це свідчить про те, що для вибору моменту зупинки зазначеного процесу необхідний додатковий критерій.

Виходячи з другого закону термодинаміки [10], нами було доведено, що найбільш ймовірний стан товщі гірських порід, ґрунту або наносів відповідає максимуму ентропії, яка виражається за допомогою відомої формули Больцмана через ймовірність виникнення кожного кластера p_j

$$S_i = -k \sum p_j \ln p_j, \quad 1 \leq j \leq N, \quad (2)$$

де k – стала.

При цьому ентропія S_i досягає мінімуму, коли ймовірності виникнення всіх кластерів рівні між собою, тобто:

$$p_j = 1 / N \quad (3)$$

У такому випадку $dS_i / dt = 0$.

В реальних умовах результати спостережень завжди мають певну похибку і тому умова (3) недосяжна, однак вона є тією величиною, на яку можна нормувати фактично отримані ймовірності виникнення кластерів в процесі виконання кластеризації.

Таким чином, у процесі кластеризації поля необоротних зрушень ґрунтової товщі підраховувалася кількість випадків, коли з точністю до похибки вимірювань виникав один і той же кластер при збільшенні їх числа. При цьому обчислюється ентропія дисипативної системи згідно залежності (2) через ймовірність p_j , яка розраховувалася як частка повторюваного кластера у загальній серед них кількості на поточному етапі кластеризації. Ця величина нормувалася на мінімально можливу ентропію. Результати експерименту показали, що дійсно, існує момент, коли ентропія досягає мінімуму, за яким слід зупинити процес кластеризації.

Друга проблема стосувалась визначення місця розташування границь кластерів. Справа в тому, що окремі члени кластера можуть бути розкидані в просторі так, що границі кластерів перекриваються, що вносить помітну невизначеність у кінцевий результат. У зв'язку з цим була використана діаграма Вороного [11], яка визначає положення кордонів кластерів на лініях, які перпендикулярні центрам відрізків, що з'єднують центри тяжкості сусідніх кластерів. Саме таке положення границь відповідає умові (3), що мінімізує невизначеність, обумовлену похибкою визначення координат реперів і точок на місцевості, або міток на моделі.

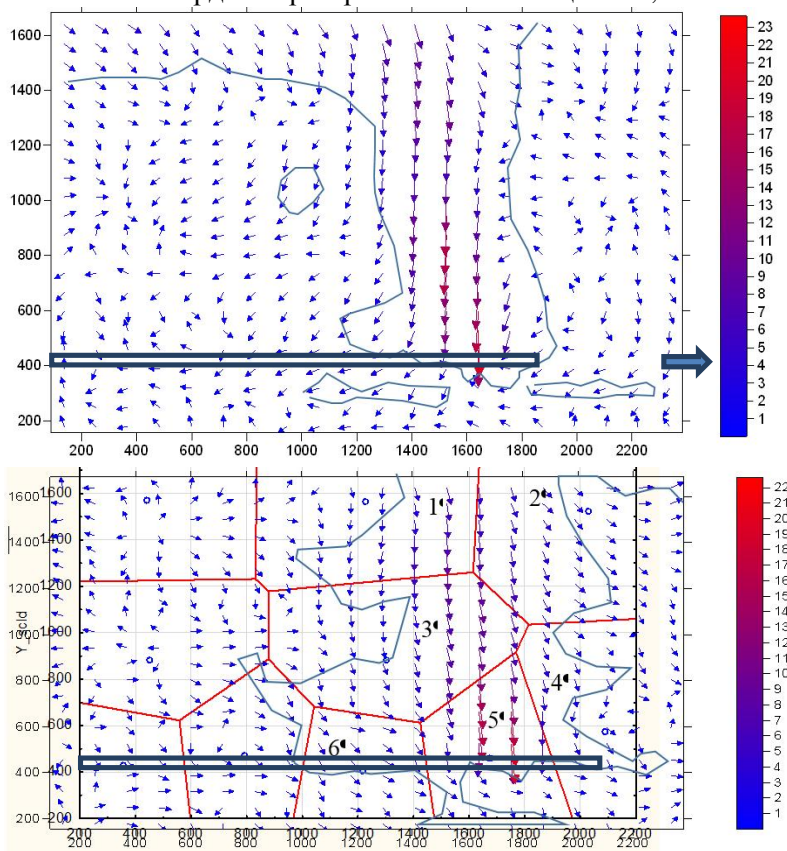


Рис. 4. Приклад кластеризації паттернів дисипативних структур у масиві гірських порід, під час відпрацювання очисного вибію

На рис. 4 показано поєднаний розподіл векторів зрушень масиву гірських порід і мозаїки Вороного. Значимі кластери, що визначені у Евклідовому просторі з достовірністю не менш за 90% помічені номерами від 1 до 6. Підкреслимо, що визначення відстані між векторами у Евклідовому просторі означає, що вказані відстані обчислюються за всіма параметрами векторів, тобто напрямком й амплітуді. Це означає, що певний кластер на перший погляд може містити різні (за довжиною, чи напрямком) вектори. Проте метод К-середніх гарантує, що усередні кластера різниця між векторами буде мінімальною за усіма параметрами. Аналіз показує, що розроблена методика кластеризації дисипативних структур досить ефективна, оскільки розділення на кластери уловлює фізичний смисл процесів необоротних зрушень товщі гірських порід. Так кластери 1 і 2 розміщені поза так

званою зоною повних обвалень, яка характеризується максимальною дезінтеграцією породної товщі і має виражену блочність.

Можна сказати, що кластери 1 і 2 розташовані вже у зони плавних прогинів товщі, яка підроблюється очисним вибієм. Різниця між кластерами 1 і 2 полягає у тому, що вектори кластеру 2 явно повернуті у бік посування очисного вибію, тоді як вектори кластеру 1 орієнтовані униз, або мають тенденцію скошуватись у бік виробленого простору.

Кластер 4 розташований над крайовою частиною вугільного пласта у так званій зоні максимального опорного тиску. Кластер 5 охоплює зону найбільш інтенсивних зрушень, яка розташована над робочим простором очисного вибію. Кластери 3 і 6 зміщені у вироблений

простір, де обвалені породи починають ущільнюватись, проте вектори кластеру 6 мають помітно більшу компоненту зрушень у напрямку посування лави, ніж вектори кластеру 3.

Отже розроблена методика кластеризації векторів інкрементальних зрушень дозволяє надійно ідентифікувати дисипативні структури, локалізуючи не тільки їх границі, але й враховуючи особливості фізичних необоротних процесів, що формують вказані структури.

Висновки. Обґрунтована методологія ідентифікації дисипативних структур, яка включає вибір оптимальної відстані між мітками або геодезичними знаками на місцевості, необхідну точність вимірювань їх координат й раціональний інтервал між послідовними сесіями моніторингу. Додатково запропоновані прийоми і заходи, які знижують вартість й трудомісткість моніторингу, а також забезпечують ідентифікацію дисипативних структур наперед заданого типу. Ефективне виявлення дисипативних структур забезпечується завдяки тому, що з одного боку параметри моніторингу гарантують ухилення від випадкових флуктуацій зміщень, обумовлених похибкою вимірювань, а з другого – унеможлиблюється пропуск інкрементальних необоротних зрушень, які несуть важливу інформацію про шлях навантаження системи.

Надійність розробленої методики ідентифікації дисипативних структур перевірена й підтверджена на фізичній моделі з дискретних матеріалів. Розроблена методика кластеризації дисипативних структур методами варіограм і К-середніх, причому границі кластерів встановлюються за допомогою діаграм Вороного. На основі формули Больцмана для ентропії обґрунтовано термодинамічний критерій оптимальної зупинки процесу кластеризації, що забезпечує достовірність виявлення дисипативних структур на рівні не менше за 90%.

Таким чином дисипативні структури у масиві гірських порід після його переходу у позамежний стан надійно виявляються моніторингом його інкрементальних (елементарних) зрушень, величина яких знаходиться у межах 2-10 середньо-квадратичних похибок вимірювання зрушень, причому центри кластерів визначаються методом варіограм і К-середніх, оптимальне число кластерів фіксується у момент досягнення ентропійного мінімуму, а їх межі локалізуються полігонами Вороного у Евклідовому просторі, що дозволяє виявити вказані дисипативні структури.

1. Pattern Recognition and Image Analysis 8th Iberian Conference, Alexandre L.A. (Ed.) IbPRIA, 2017, Faro, Portugal, June 20-23, 2017, Proceedings. 496 p.
2. Ramachandra, T.V., Bharath, H. A. and Sowmyashree, M. V. Analysis of spatial patterns of urbanisation using geoinformatics and spatial metrics. Theoretical and empirical research in urban management. 2013, 8(4): 4-24.
3. Яне Б. Цифровая обработка изображений, Техносфера, 2007, 596 с.
4. Nazimko I.V., Zakharova L.M. Clustering of the Ground Movement using Photogrammetric Methods. Proc. Int. Conf. "Surveying in geotechnologies". NMU, Dnipropetrovs'k, 2010: 46-52.
5. Zakharova, L. Generating of dissipative structures during ground irreversible movement. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2017, 8(105), 118-122.
6. Zhao, L.Y., Zhu, Q.Z., Xu, W.Y., Dai, F., & Shao, J.F. A unified micromechanics-based damage model for instantaneous and time-dependent behaviors of brittle rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 84, 187-196.
7. Berikov V., Pestunov I. Ensemble clustering based on weighted co-association matrices: Error bound and convergence properties. Pattern Recognition, 2017, 63(3): 427-436.
8. Gonzalez S., Garcia S., Lazaro M., Figueiras-Vidal A.R., Herrera F.. Class Switching according to Nearest Enemy Distance for learning from highly imbalanced data-sets. Pattern Recognition, 2017, 70(10): 12-24.
9. Rodrigues E.O., Torok L., Panos Liatsis, Jos. Viterbo, Aura Conci .k-MS: A novel clustering algorithm based on morphological reconstruction Pattern Recognition, 66(7) 2017: 392-403.
10. Kondepudi, D, & Prigogin, I. Modern Thermodynamics: from Heat Engines to Dissipative Structures. Second edition. John Wiley & Sons; XXVI. 2015.
11. Voronoi G.F. Nouvelles applications des parametres continus la theorie de formes quadratiques. Journal fer die reine und angewandte Mathematik. 1908, 134: 198-287.