

УДК 622.831.2:539.422.3

**Л.М. Захарова***Інститут фізики гірничих процесів НАН України***ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР ПІД ЧАС НЕОБОРОТНИХ  
ДЕФОРМАЦІЙ МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

*На фізичній і комп'ютерній моделях досліджено еволюцію дисипативних структур, які спонтанно виникали у масиві гірських порід під час їх необоротного деформування. Вказані структури відображаються у вигляді кластерів, що складаються з фрагментів зруйнованої породи, вектори інкрементальних зміщень яких мають певну орієнтацію або паттерн. Розроблено методіку кластеризації на основі методу K-середніх, причому границі кластерів визначаються за допомогою діаграм Вороного.*

*Ключові слова:* гірський тиск, механіка руйнування, необоротні деформації, дисипативні структури.

**Л.Н. Захарова****ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ НЕОБРАТИМЫХ  
ДЕФОРМАЦИЯХ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

*На физической и компьютерной моделях исследована эволюция диссипативных структур, спонтанно возникающих в массиве горных пород при их необратимом деформировании. Указанные структуры отображаются в виде кластеров из фрагментов разрушенной породы, векторы инкрементальных смещений которых имеют определенную ориентацию или паттерн. Разработана методика кластеризации на основе метода K-средних, причем границы кластеров определяются с помощью диаграмм Вороного.*

*Ключевые слова:* горное давление, механика разрушения, необратимые деформации, диссипативные структуры.

**L. Zakharova****INVESTIGATION OF DISSIPATIVE STRUCTURES THAT EMERGED DURING  
IRREVERSIBLE DEFORMING OF THE GROUND**

*Dissipative structure evolution has been investigated by physical modeling and computer simulation of irreversibly moving ground around underground opening. Mosaic of clusters comprising rock fragments having approximately the same vector of movement represented the dissipative structures. These structures replaced one another in discrete moments of time that facilitated effective dissipation of ground pressure energy. Distribution of the clusters and vector orientations were not symmetrical relatively the general direction of ground movement. Irreversible ground movement inside the clusters was not symmetrical too that is consequence of sequential displacement of the rock fragments and the clusters. They moved by turn, one after another minimizing entropy production. New method has been developed for identifying the dissipative structures. Irreversibly moving ground was dividing with K-meansclustering and boundaries of the clusters have been located with Voronoi tessellation.*

*Key words:* rock pressure, fracture mechanics, irreversible deformation, dissipative structure.

**Вступ**

Необоротні деформації ґрунту й масивів гірських порід супроводжують ґрунтові зсуви схилів, бортів кар'єрів, підземну розробку корисних копалин, просадку споруд та гребель. Вказані процеси створюють небезпеку для експлуатації споруд, будівель, загрожують життю людей, порушують екологічну рівновагу. Незважаючи на велику кількість виконаних досліджень, механізм необоротних деформацій твердого тіла залишається вивченим недостатньо, про що свідчать останні публікації [1]. Особливо це стосується необоротних процесів зрушення й деформування ґрунтів та масивів гірських порід навколо тунелів і підземних виробок а також зсувів ґрунтових схилів[2].

Особливістю процесу незворотного деформування масиву гірських порід є його схильність до створення складних структур навколо виробки [3]. Вказані структури мають дискретний характер і суттєво впливають на процес розширення зони непружних деформацій навколо виробки. Було доведено, що після переходу породного масиву у позамежний стан у зоні зруйнованих порід виникають короткоживучі кластери [4], які можна зафіксувати лише за умов вичленення інкрементальних необоротних зрушень. Величина таких інкрементальних зрушень повинна бути більша похибки вимірювання зміщень оточуючих виробку порід, але разом з тим, не перевищувати певний рівень. Цей рівень визначається приблизно десятикратною похибкою вимірювання зміщень.

Після руйнування оточуючі підземну виробку породи зміщуються в основному у радіальних напрямках до центру порожнини виробки. Проте детальний аналіз результатів дослідження на фізичних моделях з еквівалентних матеріалів показали, що кінематика необоротних зрушень є

набагато складнішою [4]. Виявилось, що інкрементальні необоротні зміщення порід після їх руйнування можуть змінювати напрямок відносно генерального напрямку необоротних зрушень. Тому інкрементальні зміщення порід можуть нейтралізувати одне одного, у результаті чого втрачається важлива інформація щодо складного механізму необоротного деформування порід навколо виробки, або у процесі розвитку зсуву ґрунту на похилій земній поверхні.

Встановлено [5], що короткоживучі кластери відображають еволюцію дисипативних структур. Такі структури закономірні й обумовлені другим законом термодинаміки необоротних процесів [6], згідно якому у відкритих термодинамічних системах, які пропускають через себе потоки енергії й речовини, можуть за певних умов спонтанно виникати структури, що розсіюють енергію. Наприклад, система «виробка – оточуючий масив гірських порід» є відкритою термодинамічною системою, що перетворює енергію гірського тиску у поверхневу енергію тріщин і тепло. Важливим наслідком еволюції дисипативних структур є почергове у часі і просторі зміщення порід, що суттєво знижує стійкість гірничих виробок й сприяє зсувам похилих ґрунтових поверхонь. Почерговий характер зміщення суміжних породних блоків на контурі підземної виробки було доведено шахтними інструментальними спостереженнями [8]. Проте дисипативні структури розвиваються у тривимірному просторі і для їх детального вивчення необхідно розробити відповідні методи. Отже невирішеною частиною проблеми є вдосконалення методики кластеризації інкрементальних зрушень, що сприятиме підвищенню достовірності висновків щодо почергового деформування масиву гірських порід.

Таким чином цілком статті є вдосконалення методики кластеризації інкрементальних зрушень масиву гірських порід, що дозволить дослідити дисипативні структури, які виникають під час його необоротних зрушень і деформування.

#### Вдосконалення методики кластеризації

Еволюція дисипативних структур була зареєстрована у вигляді варіації мозаїки полів інкрементальних зрушень [7,4]. На рис. 1 показано двовимірну модель виробки, яка мала прямокутний переріз розмірами 2 м x 5 м. Моделювання виконувалось у геометричному масштабі 1:35,8. У якості еквівалентних матеріалів використовувалась суміш піску, гіпсу, крейди і води у співвідношенні 92.26:2.77:1.37:3.6.

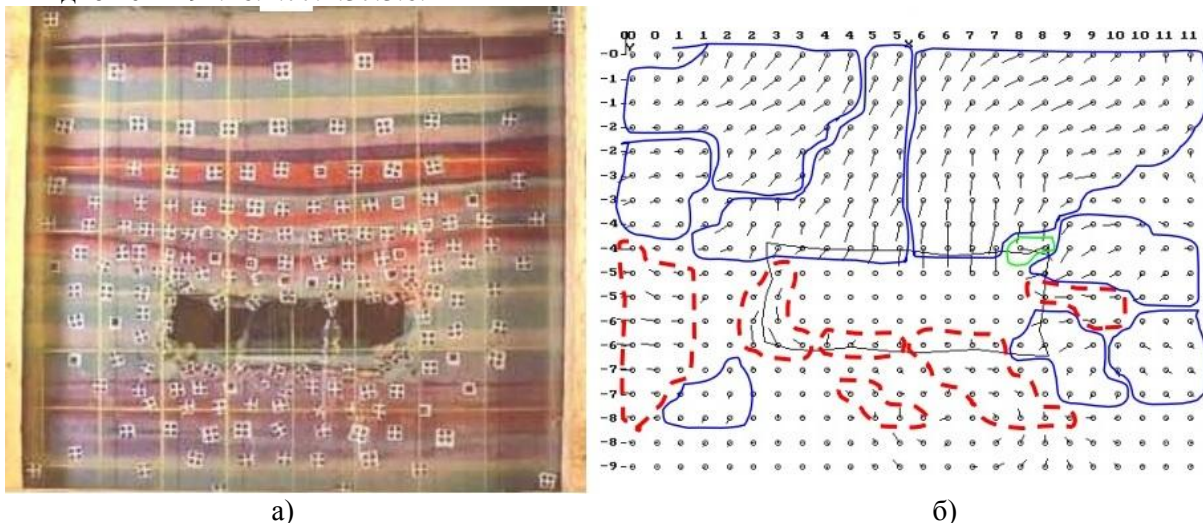


Рис. 1. - Зовнішній вигляд моделі (а) й розподіл кластерів на одному з етапів відпрацювання моделі (б)

Середня міцність уміщуючих порід становила у перерахунку на натурні умови 45 МПа, що відповідало граничному коефіцієнту стійкості виробки на глибині 600 м. У покрівлю виробки було встановлено п'ять сталеполімерних анкерів довжиною 1,8 м кожен. За таких умов навколо виробки розвивається зона зруйнованих порід, проте покрівля не обвалюється, що дозволяє здійснити детальний моніторинг необоротних зрушень і деформацій оточуючих порід з задовільною достовірністю (не менш ніж 0.95). Іншими словами такі умови дозволяють зафіксувати інкрементальні зрушення порід, амплітуда яких перевищує у 3-5 разів стандартну похибку вимірювання зрушень.

Інкрементальні зрушення фіксувались шляхом періодичної зйомки реперів (міток) на поверхні моделі нерухомою цифровою камерою. Протягом усього періоду випробування моделі було зроблено 15 знімків, за допомогою яких вдалось зафіксувати 7 дисипативних структур, які змінювали одна одну до моменту обвалення покрівлі виробки. На фрагменті (б) рис. 1 показано типову мозаїку кластерів інкрементальних зрушень, яка відображала дисипативну структуру, що виникла навколо виробки під час її випробування. Як видно, розподіл інкрементальних векторів необоротних зрушень не є симетричним. Про це свідчить як взаємне положення кластерів, так і напрямок та амплітуда векторів інкрементальних зрушень породних фрагментів. Для такого висновку достатньо простої кластеризації поля інкрементальних зрушень. У даному випадку відрізнялись чотири типи кластерів, у межах яких напрямок векторів змінювався по вертикалі (уверх – вниз) та горизонталі (вліво – вправо).

Проте для більш ґрунтовних висновків необхідна більш тонка методика розрізнення кластерів, яка б враховувала як напрямок, так і амплітуду векторів інкрементальних зрушень. Для більш детального розпізнавання самих кластерів і положення їх меж авторкою даної статті використовувалися сучасні методи кластеризації [9,10]. У даній роботі використаний один з найбільш популярних методів кластеризації К-середніх [9]. Ідея методу заснована на одночасній мінімізації варіації відстаней між векторами всередині кластерів і максимізації розкиду відстаней між центрами тяжіння кластерів. Кількість можливих кластерів змінювалася від двох і далі у бік збільшення. Перша оцінка числа кластерів виконувалася спрощеним візуальним методом, описаним вище. Далі процес класифікації контролювався динамікою дисперсій відхилень відстаней від центрів кластерів до спільного центру. Важливо підкреслити, що для візуалізації кластерної мозаїки використовувалося інтерпольоване поле зсувів гірських порід (рис. 1,б), тоді як у процесі кластерного аналізу використовувалися тільки фактичні зміни координат реперів (тобто інкрементальні зміщення), установлені на експериментальній ділянці.

Для досягнення достовірних результатів процесу кластеризації перебирались усі варіанти. У таблиці 1 показані результати обчислення відстаней між кластерами на етапі, коли їх було дев'ять штук.

Таблиця 1.

Номер кластеру	Значення Евклідових відстаней між кластерами								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00	0,87	0,69	18,75	1,05	2,70	1,63	4,38	4,17
2	0,93	0,00	1,04	12,67	1,54	0,96	3,77	3,81	8,82
3	0,83	1,02	0,00	13,96	3,20	3,96	1,01	1,60	5,69
4	4,33	3,56	3,74	0,00	22,68	14,72	20,76	8,85	37,31
5	1,03	1,24	1,79	4,76	0,00	1,46	5,14	9,03	6,41
6	1,64	0,98	1,99	3,84	1,21	0,00	8,10	8,25	12,88
7	1,28	1,94	1,00	4,56	2,27	2,85	0,00	2,86	2,63
8	2,09	1,95	1,26	2,98	3,00	2,87	1,69	0,00	10,97
9	2,04	2,97	2,38	6,11	2,53	3,59	1,62	3,31	0,00

Нижче діагоналі вказані відстані, вище – їх квадрати.

Зауважимо, що кластеризація здійснюється за величинами інкрементальних зрушень. Координати реперів, а також центрів кластерів до уваги поки не приймаються. 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.

Процес насичення дисперсій відстаней між кластерами векторів переміщень гірських порід і всередині кластерів наочно ілюструється графіками на рис. 2. На цьому рисунку показана динаміка дисперсії 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 з врахуванням обох компонент інкрементальних зрушень, оскільки важлива не тільки довжина векторів, а й їх напрямок.

Як видно з рис. 2, розкид Евклідових відстаней між векторами інкрементальних зміщень у середині кластерів зменшився до мінімального рівня й стабілізувався. Аналогічне насичення настало відносно зростання варіації відстаней між парами кластерів, що свідчить про можливість завершення процесу кластеризації. У таблиці 2 наведено членство міток (реперів) у кожному кластері починаючи з дев'ятого і закінчуючи першим. На наступному етапі визначають середнє значення координат міток у кожному кластері  $X_{кл}, Y_{кл}$  (табл. 3).

Остання операція пов'язана з нанесенням меж кластерів. Ця задача не є тривіальною, оскільки мітки сусідніх кластерів достатньо перемішані у просторі, що обумовлює деяку невизначеність їх меж. Тому для побудови меж кластерів залучено діаграми Вороного, які мінімізують невизначеність результатів. Варто додати, що теорія діаграм Вороного узгоджується з мінімумом ентропії положення границь. Це додатково посилює обґрунтованість застосування діаграм Вороного для визначення положення меж кластерів.

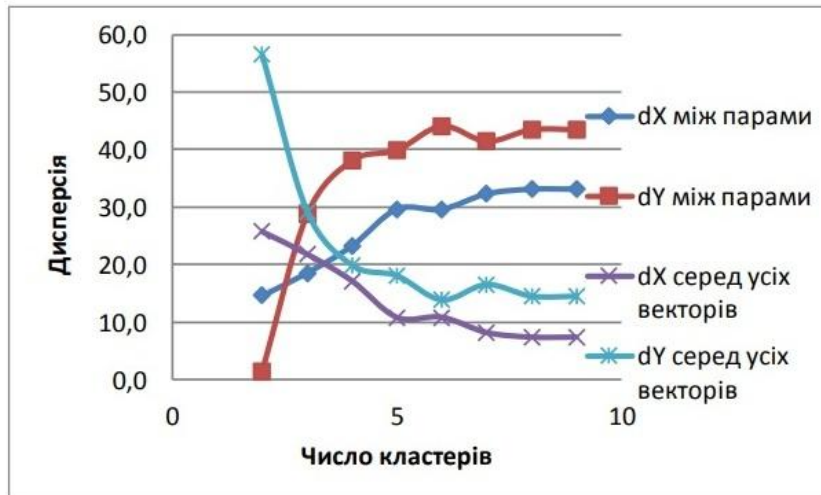


Рис. 2 – Характер стабілізації дисперсій зі зростанням числа кластерів

Таблиця 2.

**Приналежність міток (реперів) до відповідних кластерів**

9	8	7	6	5	4	3	2	1
C_16	C_14	C_3	C_1	C_17	C_83	C_2	C_20	C_5
C_65	C_32	C_4	C_8	C_22		C_31	C_21	C_7
C_85	C_39	C_6	C_9	C_33		C_35	C_30	C_25
	C_43	C_15	C_11	C_34		C_40	C_46	C_29
	C_59	C_23	C_13	C_37		C_44	C_47	C_36
	C_60	C_27	C_19	C_41		C_52	C_50	C_38
	C_82	C_28	C_24	C_45		C_64	C_51	C_42
	C_84	C_57	C_26	C_48		C_66	C_55	C_53
	C_86	C_61	C_67	C_49		C_88	C_56	C_54
	C_90	C_73	C_77	C_62			C_58	C_68
		C_74		C_71			C_63	C_70
		C_75		C_89			C_69	C_72
		C_93					C_76	C_80
							C_78	C_81
							C_79	C_91
							C_87	C_92

На рис. 3 показано накладення меж кластерів на розподіл інкрементальних векторів зрушень масиву гірських порід. Центри кластерів показані кружками. Незважаючи на те, що поле інкрементальних зрушень має досить складну структуру й інтенсивно насичене градієнтами векторів, розроблений метод кластеризації задовільно ідентифікував основні паттерни дисипативних структур.

Таблиця 3.  
Зважені параметри кластерів

$\Delta X_{кл}$	$\Delta Y_{кл}$	$X_{кл}$	$Y_{кл}$
0,26	0,025	315,1	293,6
1,27	0,87	69,3	311
-0,16	1,12	179,4	351,3
2,3	5,8	381,6	263,9
1,4	-0,87	210	301,6
2,56	0,38	105,2	353,7
-1,46	0,57	250,8	280,1
-0,68	2,83	92,4	247,9
-2,1	-2,83	141,3	361,3

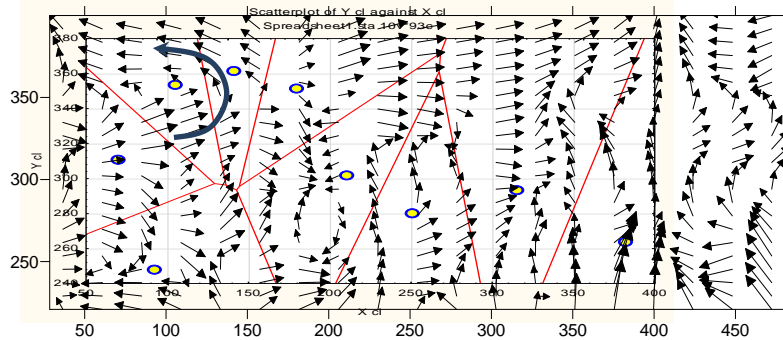


Рис. 3. - Накладення меж кластерів на поле інкрементальних зрушень

Так кластер, що має координати (69,3; 311) відображає структуру віяла, в якому потоки векторів розходяться зліва направо. Кластери (105,2; 353,7) і (141,3; 361,3) формують ротор, що закручує потік інкрементальних зрушень проти часової стрілки. Аналіз накладення показує, що деякі кластери доцільно додатково розділити. Наприклад це стосується кластеру з координатами (210; 301,6).

### Висновки

Дисипативні структури у масиві гірських порід після його переходу у позамежний стан виникають у результаті взаємодії породних фрагментів й їх кластерів, що сприяє ефективному розсіяню енергії гірського тиску. Вказані структури виявляються моніторингом елементарних або інкрементальних зрушень ґрунту та масиву гірських порід, величина яких знаходиться у межах 2-10 середньо-квадратичних похибок вимірювання зрушень, причому центри кластерів визначаються методом К-середніх, а їх межі полігонами Вороного у Евклідовому просторі.

Подальшими дослідженнями планується вдосконалення методики кластеризації дисипативних структур у частині обґрунтування і розробки додаткового критерію зупинки процесу кластеризації, який забезпечив би необхідну і достатню деталізацію паттернів дисипативних структур.

Робота виконана згідно тематики досліджень НАН України, номер держреєстрації теми 0117U00219.

### Література.

- 1.Гануліч Б. К., Матвійв Ю.Я. Про розвиток смуг плинності біля еліптичних вирізів та тріщин в умовах плоскої деформації. Наукові нотатки, 2017, Вип. 57. - С. 52-56.
- 2.Zhang J.C., Xu W.Y., Wang H.L., Wang R.B., Meng Q.X., Du S.W. (2016) A coupled elastoplastic damage model for brittle rocks and its application in modelling underground excavation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; 84:130-141.
- 3.Khomenko O., Kononenko M., Netecha M. (2016) Industrial research into massif zonal fragmentation around mineworkings. Mining of Mineral Deposits. 12(2)50 - 56.
- 4.Zacharov V.S., Hohotva A.I., Nazimko V. V., Alexandrov S.N., Sazhnev V. P., Zakharova L.N. (2003) Ground behavior investigation during roof fall in a roadway // 30 th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. - Joganessburg. 2003.
- 5.Захарова Л.М. Дисипативні структури, що супроводжують руйнування й не-оборотне деформування ґрунту і масиву гірських порід. Фізика і хімія твердого тіла. Т. 18, №2 (2017) С. 252-258. DOI: 10.15330/pcss.18.2.252-258
- 6.Kondepudi D. Prigogin I. (2015) Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. Second edition. John Wiley & Sons; XXVI. 524.
- 7.Хохотва А.И., Захарова Л.Н. Механизм обрушения кровли в выработке, закрепленной породными болтами. Труды 1-й международной научно-практической конференции «Технологические проблемы разработки месторождений минерального сырья в сложных геотехнологических условиях». - Тула, ТулГУ, 2000.-С.53-54.
- 8.Zakharova L(2017) Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rockmass. Metallurgical and mining industry. 6:39-42.
- 9.Berikov V., Pestunov I. (2016) Ensemble clustering based on weighted co-association matrices: Error bound and convergence properties. Pattern Recognition, 63(3): 427-436.
10. González S., García S., Lázaro M., Figueiras-Vidal A.R., Herrera F. (2017) Class Switching according to Nearest Enemy Distance for learning from highly imbalance data-sets. Pattern Recognition, 70(10): 12-24.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2017