

ABSTRACT

Purpose. Establishing a connection between the destruction of underground cavities and the formation of the earth's surface collapses in order to predict their magnitude and form. A detailed overview of all stages of collapses, as well as the various physical and geological conditions that contribute to it. Development of an integrated approach to solving the problem of prediction of deformations of the earth's surface over underground cavities. Based on the assessment of the situation and its changes, our approach could be applied in practice.

The methodology of research consists on observations of accident salt mines along with physical modeling. Inspection of mining and karst failures on the earth's surface, hydro-chemical testing of mine waters. Observation of changes in water level in the trenches of a flooded mine.

Findings. Are considered some typical schemes, which reveal the connection between the destruction of underground cavities and the collapses of the earth's surface. As an example, the failure in the Stebnitsky mine is described. A visual review of all the stages of collapses was provided. An integrated approach to solving the problem of prediction of deformations of the earth's surface is developed.

The originality for the first time the connection between the size and the form of the collapses of the earth's surface and the volume of underground cavities is revealed. The reason why the formation of a failure isn't accompanied by a significant earthquake is established. Also are proposed formulas for determining the size of failures, depending on the volume of underground cavities, the depth of their occurrence and the properties of rocks.

Practical implications. The research results can be used to predict the location and size of the earth's surface collapses. Also the approach applied by us to the solution of the problem of prediction of the earth's surface deformation over underground caverns can be used later for more complex mountain ranges, taking into account additional operating factors.

Keywords: *collapses, solid rock, core of fluidity, underground cavities, volume*

УДК 622.831.2:539.422.3

© Л.М. Захарова

ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ БЛИЗЬКОЇ Й ДАЛЕКОЇ ВЗАЄМОДІЙ У ПРОЦЕСІ ЕВОЛЮЦІОНУВАННЯ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР У ГІРСЬКОМУ МАСИВІ

© L. Zakharova

SUBSTANTIATION OF A SHORT AND DISTANT INTERACTION CRITERION DURING EVOLUTION OF THE DISSIPATIVE STRUCTURES IN THE ROCK MASS

Метою даного дослідження є обґрунтування критерію, який може бути використаний для класифікації близької взаємодії фрагментів породи та далекої взаємодії кластерів порід,

які спонтанно генерують дисипативні структури, що можуть виникнути внаслідок незворотного руху масиву гірських порід навколо підземної виробки.

Методологія. Теорія інформації Шеннона була використана для імітації взаємодії породних фрагментів та обміну їх інформацією. Ми також використовували код потоку частинок для дослідження механізму розподілу контактних сил серед породних фрагментів. Результати взаємодії породних фрагментів підтверджені експериментальною характеристикою механізмів мезомасштабної деформації та характеристичним розміром зерен у пластично деформованій вуглецевій сталі.

Результати дослідження. Кількість інформації, яка циркулювала між сусідніми фрагментами породи, зменшилася у 3,22 рази при переході від центрального фрагмента дискретного масиву гірської породи до другого шару прилеглих порід. Крім того, збільшення ентропії в першому шарі становило 3,1 та 3,06 разів у другому шарі, що свідчить про різке скорочення процесу взаємодії між сусідніми фрагментами гірського масиву. Тому близька взаємодія між суміжними фрагментами можлива лише з тими фрагментами, які контактують один з одним. Якщо існують посередники між взаємодіючими фрагментами масиву гірських порід, це означає, що відносини є далекими.

Наукова новизна. Уперше було обґрунтовано критерій для класифікації близької взаємодії з сусідніми фрагментами масиву гірських порід та віддаленими взаємовідносинами кластерів порід.

Практична значимість. Новий критерій класифікації близької та далекої взаємодії сусідніх фрагментів і кластерів масиву гірських порід полегшує підбір оптимальної технології управління дисипативними структурами, що дуже важливо для забезпечення стійкості підземних виробок та їх безпечної експлуатації.

Ключові слова: управління станом масиву гірських порід, незворотні зрушення, дисипативні структури, близька взаємодія, далека взаємодія, критерій

Вступ. Проблема забезпечення стійкості порід навколо гірничих виробок не тільки залишається актуальною, але й неухильно загострюється зі збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин та розширення використання підземного простору в урбанізованих районах. Вирішення вказаної проблеми нерозривно пов'язане з управлінням процесами необоротних зрушень і деформацій масиву гірських порід, які виникають унаслідок переходу порід у поза межний напружено-деформований стан [1].

Останнім часом отримав розвиток новий науковий напрям, який вивчає закономірності термодинаміки необоротних процесів стосовно масивів гірських порід і ґрунтів [2,3,4]. Доведено, що під час ініціації необоротних зрушень ґрунту, або масиву гірських порід закономірно й спонтанно виникають дисипативні структури, які проявляються у вигляді мозаїчного розподілу векторів інкрементальних зрушень і послідовно, стрибкоподібно змінюють одна одну на тлі зрушень фрагментів, які змінюються плавно і безперервно [5]. Дисипативні структури складаються з окремих короткоживучих кластерів, що зливаються, перегруповуються, або розділяються, причому в інкубаційний період розвитку необоротних зрушень переважають роторні й потокові паттерни, які сприяють накопиченню степенів вільності для фрагментів, що перетворює масив на дискретне середовище. Роль триггерів, що запускають такі дискретні зміни паттернів дисипативних структур виконують випадкові флуктуації дисбалансу внутрішніх сил, що діють усередині масиву гірських порід, причому інкрементальні

вектори необоротних зміщень породних фрагментів виконують роль термодинамічних потоків, а флуктуації дисбалансу внутрішніх сил – роль термодинамічних сил.

Виявлена близька взаємодія між суміжними породними фрагментами масиву і між замками піддатливості рамного кріплення у вигляді протифазного інкрементального тривимірного зміщення у часі і просторі контурних реперів один відносно одного, та протифазної піддатливості замків у межах однієї рами з коефіцієнтом тісноти зв'язку 0,6-0,8, та на сусідніх рамах з коефіцієнтом 0,4-0,5. Далека взаємодія кластерів дисипативних структур навколо гірничої виробки встановлена за допомогою шахтних інструментальних спостережень розтягування інтервалів масиву уздовж свердловин, в яких були встановлені глибинні репери; у формі стрибкоподібного у часі і дискретного у просторі, а також несиметричного відносно осі виробки розширення зони зруйнованих порід; несиметричного перерозподілу деформацій відносно розширення-стиснення порід навколо вертикальної осі перерізу виробки [5,6].

Проте критерій близької і далекої взаємодій не встановлено, що заважає ефективно управляти вказаними дисипативними структурами і є невирішеною наразі проблемою.

У зв'язку з цим **метою статті** є обґрунтування критеріїв близької й далекої взаємодій, що супроводжують необоротні процеси зрушень і деформування масиву гірських порід та ґрунтів.

Виклад основного матеріалу. Поняття «близька» й «далека» взаємодія повинні бути уточнені з оглядом на їх важливість у механізмі формування дисипативних структур та їх еволюції. У даній роботі досліджується еволюція дисипативних структур у макромасштабі згідно класифікації ІГТМ [7]. Тому наноси або масив гірських порід розглядається як середовище, що розділене на елементарні складові фрагменти, які характеризуються так званою блочністю. Рац М. і Чернишов В. [8] запропонували логічний підхід до обчислення кількісної характеристики блочності, яка по суті є середньою геометричною величиною з відстаней між тріщинами основних систем, які формують геологічну структуру масиву. Фактично блочність являє собою розмір ребра кубу, об'єм якого дорівнює середньозваженому об'єму блоків довільної форми, що складають масив.

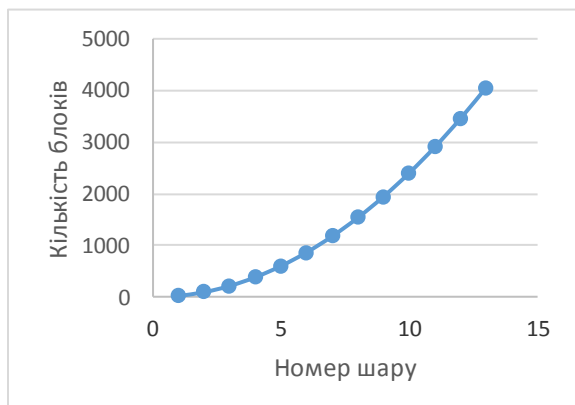


Рис. 1. Залежність числа блоків від порядкового номеру шару

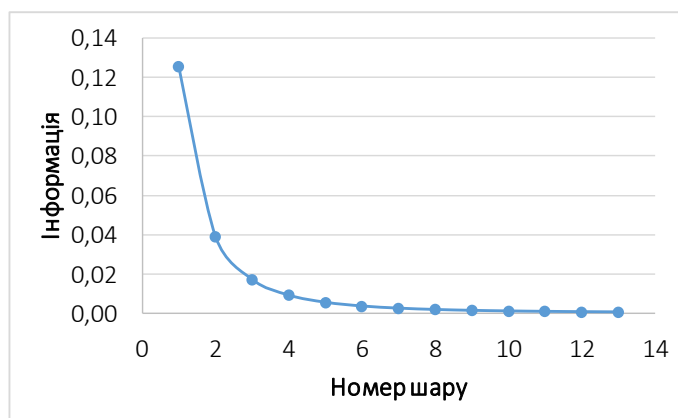


Рис. 2. Залежність інформації від номеру шару

Отже розглянемо сукупність ґрунтових або породних блоків, які оточують певний блок, який назвемо центральним. У першому шарі, що оточує цей блок міститься 26 сусідніх блоків. Шестеро таких блоків контактують з центральним блоком по граням, дванадцять по ребрам, решта по вершинах. Важливо, що всі 26 блоків безпосередньо контактують з центральним блоком. У другому шарі, який оточує блоки першого, міститься 98 блоків і так далі. На рис. 1 наведено графік залежності кількості блоків від номеру шару, що оточує центральний блок. Кількість блоків збільшується згідно параболічній залежності з віддаленням від центрального блоку. Користуючись виразом Хакена Г. [9] про те, що складові термодинамічної системи «відчувають» одна одну під час формування дисипативної структури, визначимо за Шенноном К. [10] величину інформації, якою може обмінюватись центральний блок з оточуючими його блоками у процесі взаємодії. На рис. 2 видно, що кількість інформації різко (у 3,22 рази) зменшується під час переходу від першого до другого шару й швидко зменшується при подальшому віддаленні від центрального блоку.

Те ж саме можна сказати й про ентропію взаємодії, яка обчислювалась згідно формули Больцмана (рис. 3). Величина ентропії зростає від 3,1 у першому шарі до 9,5 або у 3,06 рази на другому в залежності від кількості проміжних блоків, які беруть участь у взаємодії (вказані для трьох графіків як 1, 2 і 3). Ентропія обчислювалась як логарифм від числа можливих сполучень або комбінацій блоків без помноження на константу Больцмана і тому не має розмірності. Характерно, що зі збільшенням числа взаємодіючих блоків ентропія зростає. Такі результати задовільно узгоджуються з результатами досліджень [11], які експериментально довели, що похибка вимірювання локальних деформацій сталі зменшується у $0,022/0,0071=3,09$ рази після збільшення вікна усереднення удвічі у порівнянні з середнім розміром зерна.

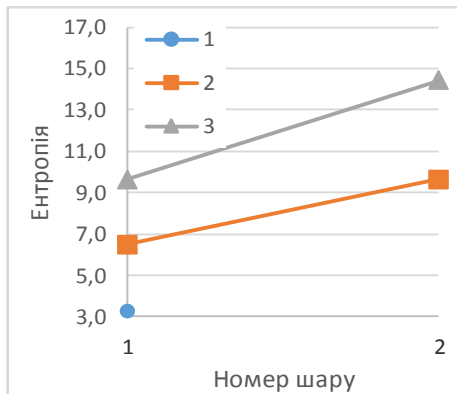


Рис. 3. Залежність ентропії від номеру шару й кількості блоків

На практиці не всі блоки мають однаковий шанс приймати участь у взаємодії з центральним блоком. Зазвичай нерівнокомпонентність напружень, анізотропія гірського масиву, різні фізико-механічні властивості порід відбирають певний напрямок, уздовж якого ймовірність взаємодії збільшується. Приклад такого відбору ілюструється на рис. 4.

На цьому рисунку наведено результати моделювання процесу випуску сипучої маси з бункерів за допомогою платформи PFC3D. Частинки гірської породи різного розміру (від 3 см до 10 см) під дією власної ваги зміщуються униз, витікаючи з бункерів. Величина коефіцієнтів тертя між частинками у першому варіанті дорівнює 1, а тертя частинок об поверхню бункерних стінок відсутнє завдяки використанню ідеальної змазки (рис. 4,а). На правому фрагменті обидва відповідні коефіцієнти дорівнюють 1,78. Як видно на рисунку, різниця фізичних властивостей породи суттєво вплинула на динаміку необоротних зміщень породних частинок.

внює 1, а тертя частинок об поверхню бункерних стінок відсутнє завдяки використанню ідеальної змазки (рис. 4,а). На правому фрагменті обидва відповідні коефіцієнти дорівнюють 1,78. Як видно на рисунку, різниця фізичних властивостей породи суттєво вплинула на динаміку необоротних зміщень породних частинок.

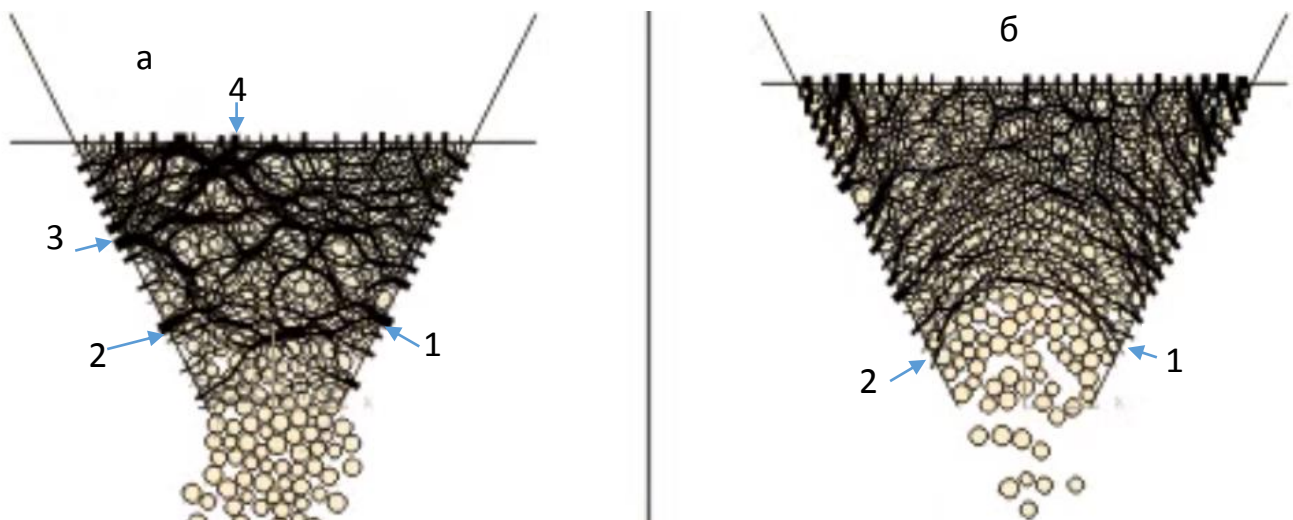


Рис. 4. Графіки зміщень міток

(<https://www.itascainternational.com/granular-flow-from-a-hopper>)

(а) – 1,0; 0,0; (б) – 1,78

Так на лівому фрагменті випуск дробленої породи відбувається значно швидше, причому частинка 1 відчуває тиск багатьох частинок, включаючи такі найбільш віддалені куски, як, наприклад, 2, 3 і 4. Це помітно по темних лініях контактних зусиль, що з'єднують відповідні частинки.

На правому фрагменті частинка 1 відчуває взаємодію лише з обмеженою кількістю частинок, які вишикувались уздовж дуги у вигляді склепіння, що з'єднує частинки 1 і 2.

Тим не менш у обох випадках ланцюжки між найбільш віддаленими фрагментами дискретного середовища можуть складатись з великої кількості фрагментів, що виконують роль посередників, за допомогою яких реалізується взаємодія. Очевидно, що така взаємодія між віддаленими фрагментами масиву гірських порід повинна кваліфікуватись як далека. Проте попередній аналіз, результати якого відображені на рисунках 2 і 3, однозначно вказують на те, що близька взаємодія може відбуватись лише на суміжних фрагментах, які безпосередньо контактують один з одним. Наявність навіть одного проміжного фрагмента або посередника конвертує близьку взаємодію у далеку й не менш ніж у 3,1 рази (фактично стрибкоподібно) зменшує обмін інформацією між фрагментами, що взаємодіють між собою.

Це означає, що близька взаємодія відбувається між фрагментами масиву гірських порід, які безпосередньо контактують між собою і знаходяться усередині одного й того ж кластеру, або утворюють границі сусідніх кластерів. Фрагменти, що розташовані навіть у межах одного кластеру, але не знаходяться у безпосередньому або прямому контакті між собою реалізують взаємодію дальнього порядку.

Що стосується кластерів, то з формальної точки зору вони взаємодіють як близькі у разі прямого контакту їх границь й утворюють ланцюги далекої взаємодії лише через проміжні кластери, які знаходяться між ними. Проте натурний експеримент показав, що кластери можуть створювати такі масштабні паттерни дисипативних структур, як ротори, діаметр яких сягає 18 м і навіть структурні потоки, довжиною до 35 м [5]. Такі взаємодії треба характеризувати як далекі, причому в межах одного й того ж кластеру фрагменти можуть здійснювати взаємне переміщення.

Важливо відмітити, що число паттернів близької взаємодії обмежене. Близька взаємодія може реалізувати лише дві степені вільності: поступальну шляхом проковзування фрагментів один відносно одного й обертальну у наслідок взаємного обкатування. У натурних умовах найбільш надійно реєструється взаємодія у вигляді поступального взаємного проковзування фрагментів, що виглядає як їх протифазне, почергове необоротне зрушення.

У зв'язку з цим важливо також уточнити поняття інкрементальних необоротних зрушень. Інкрементальним необоротним зрушенням слід назвати лише таке, що відбувається між моментами зміни послідовних, тобто сусідніх у часі, паттернів дисипативних структур. Важливо відмітити, що величина векторів інкрементальних необоротних зрушень зазвичай є різною і у випадку експериментальної зсувної ділянки ґрунтового схилу коливається у межах від 5 до 90 мм. Натомість відповідний інкрементальний відрізок часу є однаковим для всіх інкрементальних векторів. Це пояснюється тим, що зміна послідовних паттернів дисипативних структур відбувається стрибкоподібно, одномоментно для

усієї ділянки масиву гірських порід чи наносів, що знаходиться у нерівноважному стані й визнає необоротне зрушення.

Отже прогнозування наступної сесії моніторингу координат реперів можна здійснювати як за середньозваженою величиною необоротних зміщень, так і за очікуваним моментом зміни поточного паттерну дисипативної структури на послідовну. Для такого прогнозу доцільно застосувати марківські ланцюги, або послідовності, склавши таблицю переходів на основі попередніх результатів моніторингу. Чим довше буде тривати процес інструментальних спостережень, тим точніше буде прогнозування.

Обґрунтований критерій близької взаємодії окремих породних фрагментів і далекої взаємодії породних кластерів дає можливість вибирати раціональні технології для ефективного управління дисипативними структурами в складних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умовах розробки родовищ корисних копалин.

Висновки. Розділення близької взаємодії породних фрагментів і далекої взаємодії їх кластерів у ході спонтанного виникнення дисипативних структур під час необоротних зрушень і деформацій масиву гірських порід виконане з залученням теорії інформації Шеннона К. і формули Больцмана Л. Доведено, що близька взаємодія можлива лише між сусідніми породними фрагментами, що безпосередньо контактують між собою, або по границям сусідніх кластерів, сформованих з цих фрагментів. Обґрунтований критерій близької і дальньої взаємодії дозволяє вибрати раціональні технології для управління дисипативними структурами, які виникають у складних гірничо-геологічних умовах розробки родовищ корисних копалин. Такі технології сприяють подальшому підвищенню стійкості масиву гірських порід і збереженню опору кріплення підземних виробок.

Подальший розвиток досліджень у даному напрямку планується виконати у напрямку вибору оптимальних параметрів технологій управління дисипативними структурами у масиві гірських порід, що перебувають у стані незворотного зрушення і деформування.

Перелік посилань

1. Шашенко, А.Н., Сдвижкова, Е.А., Гапеев, С.Н. (2008). *Деформируемость и прочность массивов горных пород*: Монография. Днепропетровск: Национальный горный университет.
2. Захарова, Л.М. (2017). *Фізичні основи еволюції дисипативних структур в геомеханіці*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing.
3. Zakharova, L. (2015). Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 40 - 43.
4. Захарова, Л.М. (2015). Дисипативні структури, що супроводжують руйнування й необоротне деформування ґрунту і масиву гірських порід. *Фізика і хімія твердого тіла*. 18(2), 252-258. DOI: 10.15330/pcss.18.2.252-258.

5. Гріньов, В.Г., Захарова, Л.М. (2017). Основи забезпечення стійкості підготовчих виробок в умовах необоротного деформування масиву гірських порід. *Уголь України*, 10, 3–11.
6. Захарова, Л.М. (2014). Дослідження дисипативних структур під час необоротних деформацій масиву гірських порід. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Луцьк, 59, 112–118.
7. Паламарчук, Т.А., Кириченко, В.Я., Усаченко, Б.М. (2006). Элементы механосинергетики породного массива. Днепропетровск: "Лири ЛТД", 2006.
8. Рац, М.В., Чернышев, С.Н. (1970). *Трещиноватость и свойства горных пород*. Москва: Недра.
9. Haken, H. (2014). *The science of structure: synergetics*. New York: Van Nostrand Reinhold. 3d ed.
10. Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423, 623–656.
11. Ravindran, S. Koohbo, B. & Kidane, A. (2017). Experimental characterization of mesoscale deformation mechanisms and the RVE size in plastically deformed carbon steel. *Strain*, 53, e12217. DOI 10.1111/str.12217

АННОТАЦІЯ

Целью данного исследования является обоснование критерия, который может быть использован для классификации близкого взаимодействия фрагментов породы и дальнего взаимодействия кластеров пород, спонтанно генерирующих диссипативные структуры, которые могут возникнуть вследствие необратимого сдвижения массива горных пород вокруг подземной выработки.

Методология. Теория информации Шеннона была использована для имитации взаимодействия породных фрагментов и обмена их информацией. Мы также использовали код потока частиц для исследования механизма распределения контактных сил среди породных фрагментов. Результаты взаимодействия породных фрагментов подтверждены экспериментальной характеристикой механизмов мезомасштабной деформации и характеристическим размером зерен в пластически деформированной углеродистой стали.

Результаты исследования. Количество информации, циркулирующей между соседними фрагментами породы, уменьшилась в 3,22 раза при переходе от центрального фрагмента дискретного массива горной породы ко второму слою прилегающих пород. Кроме того, увеличение энтропии в первом слое составило 3,1 и 3,06 раза во втором слое, что свидетельствует о резком сокращении процесса взаимодействия между соседними фрагментами горного массива. Поэтому близкое взаимодействие между смежными фрагментами возможно только с теми фрагментами, которые контактируют друг с другом. Если существуют посредники между взаимодействующими фрагментами массива горных пород, это означает, что отношения их являются дальними.

Научная новизна. Впервые было обосновано критерий для классификации близкого взаимодействия с соседними фрагментами массива горных пород и удаленными взаимодействиями кластеров пород.

Практическая значимость. Новый критерий классификации близкого и дальнего взаимодействия соседних фрагментов и кластеров массива горных пород облегчает подбор оптимальной технологии управления диссипативными структурами, что очень важно для обеспечения устойчивости подземных выработок и их безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: управление состоянием массива горных пород, необратимые сдвигения, диссипативные структуры, близкое взаимодействие, дальнее взаимодействие, критерий.

ABSTRACT

Purpose. The objective of this paper is to substantiate a criterion, which may be used for classifying close cooperation of rock fragments and distant cooperation of rock clusters that spontaneously generate dissipative structures that may emerge due to irreversible ground movement around underground opening.

Methodology. Shannon's theory of information has been employed to simulate the rock fragment interaction and interchange their information. We used particle flow code to investigate mechanism of contact forces distribution among rock fragments. Result of rock fragment interaction were validated using experimental characterization of mesoscale deformation mechanisms and the RVE size in plastically deformed carbon steel.

Findings. Amount of information that circulated between adjacent rock fragments dropped by 3.22 times during transition from the central fragment of the rock mass to the second layer of adjacent rocks. In addition, entropy increase in the first layer 3.1 times and 3.06 times in the second layer, that demonstrates abrupt reduction of the interaction process between adjacent fragments of the rock mass. Therefore, close interaction is possible between adjacent rock fragments only that contact to each other. If there are mediators between interacting rock fragments, it does mean the relations are distant.

Originality. It was in the first time when a criterion has been substantiated for classifying close interaction of adjacent rock fragments and distant cooperation of the rock clusters.

Practical implications. New criterion for separation close and distant interaction of adjacent rock fragments and clusters facilitates selection of the optimal technology for dissipative structures control that is very important for providing stability of the underground openings and their safe maintenance.

Keywords: ground control, irreversible ground movement, dissipative structures, close interaction, distant cooperation, criterion