

© В.Д. Сидоренко¹, А.О. Романенко², В.В. Панченко³

¹ Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

² ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат», Кривий Ріг, Україна

³ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ ДІЛЯНКИ БОРТУ ЗАЛІЗОРУДНОГО КАР'ЄРУ

© V. Sidorenko¹, A. Romanenko², V. Panchenko³

¹ Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

² Private Joint Stock Company Central Iron Ore Enrichment Works, Kryvyi Rih, Ukraine

³ National Technical University «Dnipro Polytechnic», Dnipro, Ukraine

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE STABILITY RESERVE OF IRON ORE PIT BOARD SECTION

Метою даної статті є розробка нової методики оцінки запасу стійкості ділянок борту залізорудного кар'єру.

Послідовність виконання роботи. Для досягнення поставленої мети на першому етапі виконувалась фотозйомка високої роздільної здатності для характерних ділянок борту кар'єру з послідуною комп'ютерною обробкою фотознімків для оцінки тріщинуватості гірських порід.

Наступним етапом був розрахунок фрактальної розмірності ділянки масиву по отриманим знімкам за допомогою програм ImageJ та FracLac, що включають пакет плагінів (додатків) MicroMod2015.

Далі для подальшої оцінки порушеності масиву за рахунок тріщинуватості виконувалось дослідження зв'язку фрактальної розмірності з коефіцієнтом структурного ослаблення (цей коефіцієнт визначається класичним методом через співвідношення міцності гірських порід у масиві й у зразку).

На останньому етапі роботи після встановлення вказаного зв'язку і розрахунку коефіцієнту структурного ослаблення порід за результатами визначення фрактальної розмірності виконувалась оцінка запасу стійкості ділянок борту залізорудного кар'єру. Для цього використовувалась відома залежність коефіцієнту запасу стійкості від коефіцієнту структурного ослаблення порід. За результатами порівняння фрактальної розмірності ділянок оголеного масиву за фотознімками з розрахунком за класичними методами, розбіжність коефіцієнту структурного ослаблення відрізняється на 5-10%. Це свідчить про задовільну збіжність і дозволяє використовувати дану експрес - методику для оцінки тріщинуватості ділянки борту кар'єру через її фрактальну розмірність.

Наукова новизна отриманих результатів - вперше встановлена аналітична залежність коефіцієнту структурного ослаблення порід від фрактальної розмірності тріщин масиву, що дозволило спростити процедуру його розрахунку.

Практична значимість даної роботи полягає у створенні нової методики оцінки запасу стійкості ділянок борту залізорудного кар'єру на основі фрактального аналізу тріщинуватості порід.

Ключові слова: кар'єр, стійкість борту, тріщинуватість, фрактальна розмірність, коефіцієнт структурного ослаблення, запас стійкості борту.

Актуальність роботи полягає у тому, що проблема визначення стійкості укосів та бортів глибоких кар'єрів набуває все більшого значення у зв'язку з їх постійним поглибленням.

Для умов залізородних кар'єрів одним з найбільш значних факторів, що впливають на збереження цілісності борту є фактор тріщинуватості, який характеризується коефіцієнтом структурного ослаблення, що традиційно визначається через відношення міцності гірських порід у масиві й у зразку і залежить від розмірів масиву, який деформується, величини блоків, їхньої форми і міцності.

Традиційний підхід відзначається трудоємністю і суттєвими витратами часу. Тому створення нової методики у доповнення до традиційної, що дозволить оперативно контролювати стійкість борту, є актуальною задачею.

Аналіз науково-практичних розробок.

Тріщинуватість, як і міцність є одним з головних критеріїв оцінки стійкості породи, від якої залежить спосіб формування та відпрацювання гірничих виробок. При подрібненні породи вибухом від тріщинуватості залежить кількість енергії, яку необхідно надати породі для її поділу на блоки потрібної величини, а отже, кількість потрібної вибухової речовини та термін стояння масиву на робочому або проектному контурі.

Коефіцієнт запасу стійкості визначається через відношення сил утримуючих до сил зрушуючих. Методику класичного розрахунку коефіцієнту запасу стійкості методом алгебраїчного додавання сил (рис.1) запропонував Фісенко Г.Л. [1]. Основним посилом цієї методики є рівняння:

$$\eta_3 = \frac{\sum_{i=1}^N m_i g \cos \beta_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^N C_i a_i l_i}{\sum_{i=1}^N m_i g \sin \beta_i}$$

де m_i – маса частини породного масиву, g – прискорення вільного падіння, l_i – довжина i -ї ділянки призми зсуву, C_i – зчеплення в масиві для ділянки розрахунку.

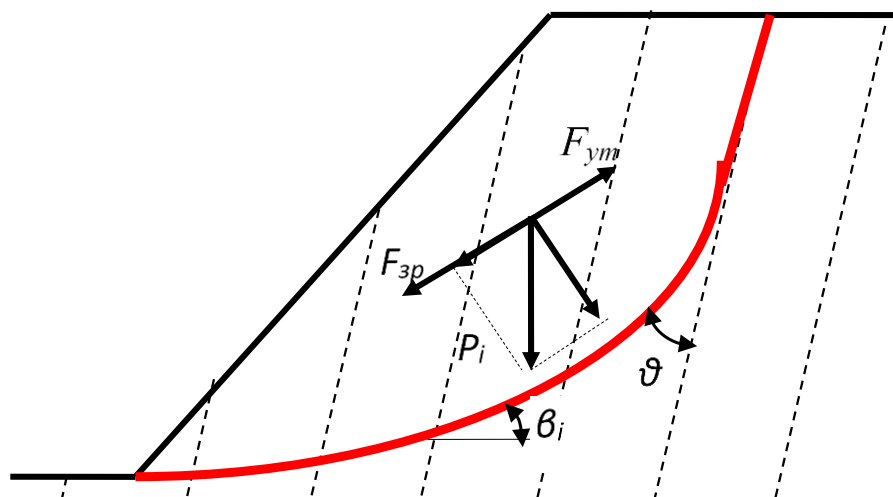


Рис. 1. Схема розрахунку стійкості борту в методиці Фісенко Г.Л.

Перехід від міцності в зразку до її величини в масиві здійснюється через коефіцієнт структурного ослаблення, який дорівнює:

$$\alpha = \frac{C_m}{C_z},$$

де C_m – зчеплення в масиві, C_z – зчеплення у зразку.

До основних недоліків визначення коефіцієнту структурного ослаблення за рахунок проведення серій лабораторних випробувань є перенесення порушень локального зразка на весь масив, оскільки він, як правило, має неоднорідності по всій поверхні його оголення, які також можуть розподілятися нерівномірно [2].

В інженерній практиці фрактальний аналіз використовується, якщо є підстави говорити про наявність самоподоби і фрактальної розмірності у об'єкта дослідження. До таких робіт, зокрема, відносяться роботи Б. Мондельброта, А.А. Гриффітса, А.Ф. Іофе, Г.В. Колосова та ін. Так, А.Ф. Іофе вперше роз'яснив причину різниці між технічною та теоретичною міцністю [3]. Слід також відзначити критерій руйнування А.А. Гриффітса, оснований на енергетичному балансі для розрахунку руху тріщин. Також у роботах А.А. Лебедева, В.З. Партона, А.Н. Гузя, І.А. Міклашевича та ін. показано, що для описання мікроособливостей реальних тріщин доцільно використовувати фрактальні моделі [4,5]. Дослідженням фрактальних підходів до вирішення задач геомеханіки присвячені роботи Булата А.Ф., які виконані для вугільних родовищ Донбасу [6].

Наразі у більшості науково-практичних розробок тріщини та їх системи розглядають окремо, не враховуючи зовнішню структуру тріщин масиву та його порушеність за рахунок ведення гірничих робіт. У даній роботі на основі реальних фотознімків та прикладного комплексу програм виконується визначення коефіцієнта структурного ослаблення з урахуванням реальної структури масиву [7].

Виклад основного матеріалу. Фрактальна розмірність – це показник, який описує фрактальні структури або множини, базуючись на кількісній оцінці їх складності, як відображення зміни деталей при зміні масштабу. Основна ідея переходу до фрактальної розмірності полягає в описанні геометрично складних форм, для яких деталі важливіші, ніж повний рисунок [8]. Однією з таких форм у наведеній статті розглядаються тріщини в масиві.

Для вибору ділянок, що характеризують порушеність масиву за рахунок тріщинуватості, необхідно знайти місця з найбільш оголеними ділянками борту кар'єру.

Для умов Інуглецького кар'єру такими місцями стали: здвоєні уступи на південно-західному борту кар'єру, виставлені в граничне положення методом контурного підривання; здвоєні уступи південно-західного борту, виставлені в граничне положення, з використанням свердловин змінної глибини; здвоєні уступи західного борту, виставлені в граничне положення по напластуванню (рис. 2). Таким чином був виконаний перший етап роботи.

Кожна система тріщин відрізняється між собою різними характеристиками, до яких відносяться: відстань між тріщинами, ширина, протяжність та глибина

(від декількох сантиметрів до кількох метрів). Тріщини поділяють породний масив на природні окремої, які називаються природними блоками. Розміри природних окремої, тобто блочність масиву, гранулометричний склад залежать від кількості систем тріщин та відстані між тріщинами в кожній системі. Зі збільшенням кількості систем та зменшенням відстаней між тріщинами розміри природних окремої зменшуються. В гірничо-технічній літературі та у практиці відкритих гірничих робіт широко використовуються класифікація гірських порід по тріщинуватості, запропонована В.К. Рубцовим [9].

Згідно з цією класифікацією за ступенем тріщинуватості виділено 5 категорій – від надзвичайно тріщинуватих (мілкоблочних), що відносяться до першої категорії, до практично монолітних (крупноблочних) – тріщини п'ятої категорії.

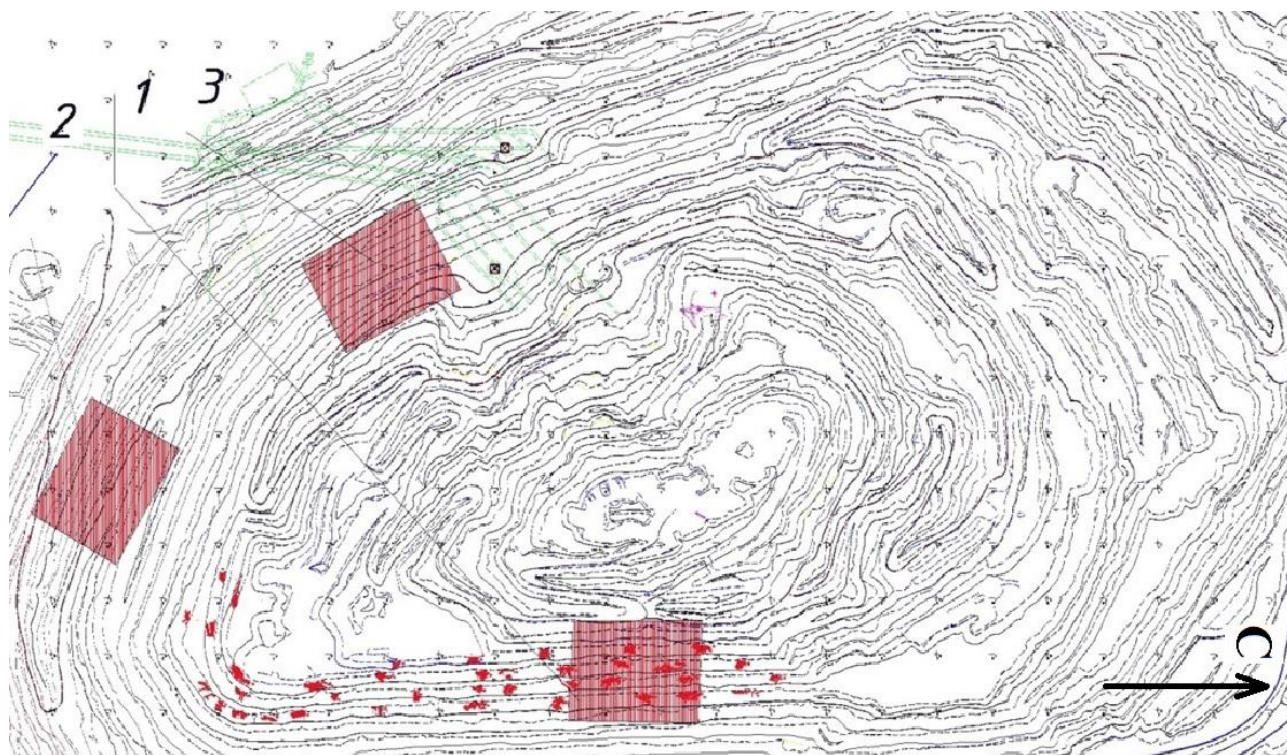


Рис. 2. Схема розміщення ділянок, вибраних для фотозйомки (1 – маркшейдерські осі 46-56 ÷ 57-61, гор. -300 ÷ -240; 2 – маркшейдерські осі 32-36 ÷ 51-55 гор. -200 ÷ -120; 3 – маркшейдерські осі. 38-32 ÷ 45-49 гор. -180 ÷ -90)

Фотознімок декількох уступів борту кар'єру дозволяє відокремлювати II-V ступінь тріщинуватості масиву з розмірами тріщин по протяжності до 5-10 мм. При дослідженні тріщинуватості одного уступу та зменшенні відстані до ділянки борту при фотографуванні, можна перейти до відокремлення й тріщинуватості I-ї категорії.

Питома тріщинуватість масиву – це кількість тріщин, що доводиться на 1 погонний метр протяжності масиву, а також при наявності в масиві природних блоків відповідних розмірів (в класифікації прийняті розміри блоків становлять 300, 700 та 1000 мм). Так, у надзвичайно тріщинуватих мілкоблочних масивах I-ї категорії на 1 погонний метр приходиться більше 10 тріщин, а середня відстань

між ними не перевищує 0,1 м. При цьому наявність в масиві окремих крупностей 300 мм не перевищує 10% об'єму, а окремоостей розміром 700-1000 мм в масиві немає зовсім.

У масивах V-ї категорії середня відстань між тріщинами перевищує 1,5 м, а розміри практично усіх природних окремоостей складають більше 1000 мм.

Для вибору розміру квадрата взято розмір максимальної та мінімальної окремоті, що можна виділити по отриманому фотознімку. У піксельному еквіваленті розмір мінімальної окремоті, що може бути виділена, складає 1 піксель, а максимальний розмір квадрата залежить від форми об'єкту, він підбирається за допомогою програми таким чином, щоб можна було повністю вписати у нього об'єкт (тобто ділянку борту, тріщинуватість якої підраховується).

Але, перед накладанням сітки необхідно виконати обробку зображення таким чином, щоб на ньому було чітко видно межі тріщин. Для прикладу на рис. 3, а) зображення з нечіткою тріщинуватістю, а рис. 3, б) вже пройшов обробку з виділенням чіткості тріщин. До того ж на рис. 3, б) відокремлено ділянку борту, на якій в подальшому буде визначатись фрактальна розмірність. Таким чином був виконаний другий етап роботи, який включає визначення вихідних параметрів сітки та відокремленні досліджуваної ділянки борту кар'єру з загального фотознімку.

Для об'єктів, які важко описати за допомогою евклідових мір, таких як діаметр або довжина, але які можуть бути кількісно оцінені за допомогою мір складності (через фрактальну розмірність), доцільно використовувати такий інструмент, як комп'ютерна програма FracLac, що виконує сканування зображення з використанням алгоритму зсуву сітки, що може виконувати кілька сканувань з різних місць на кожному зображенні, і використовує метод неперекриваючих або перекриваючих ковзаючих рамок.

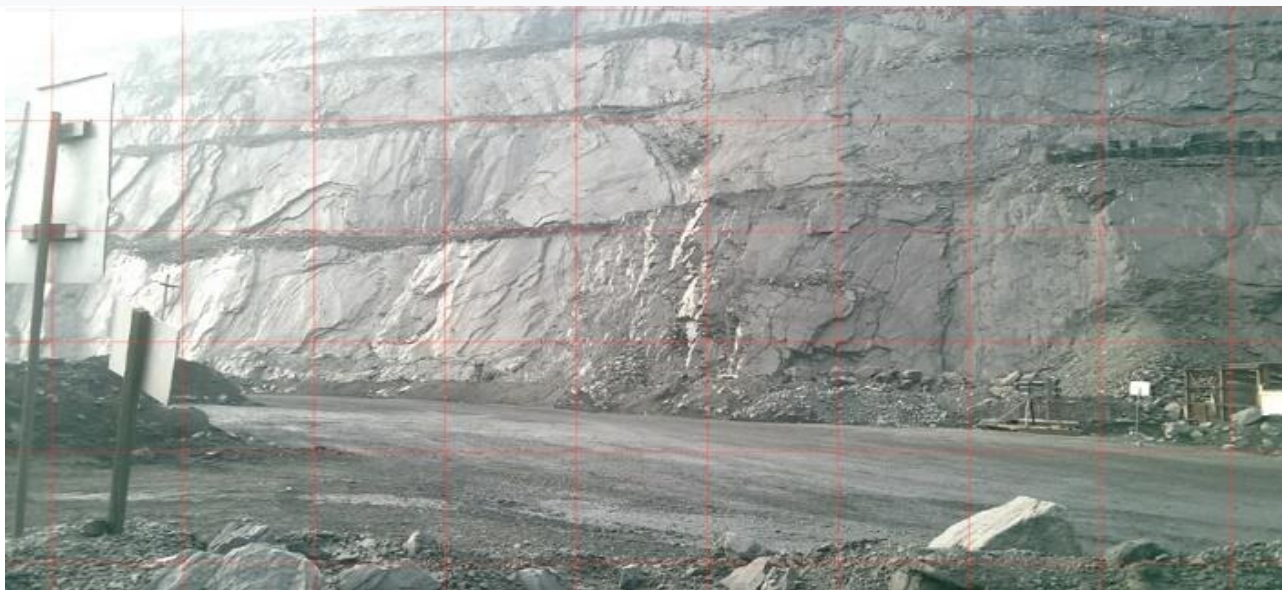


Рис. 3, а). Фотознімок ділянки борту кар'єру з накладанням сітки

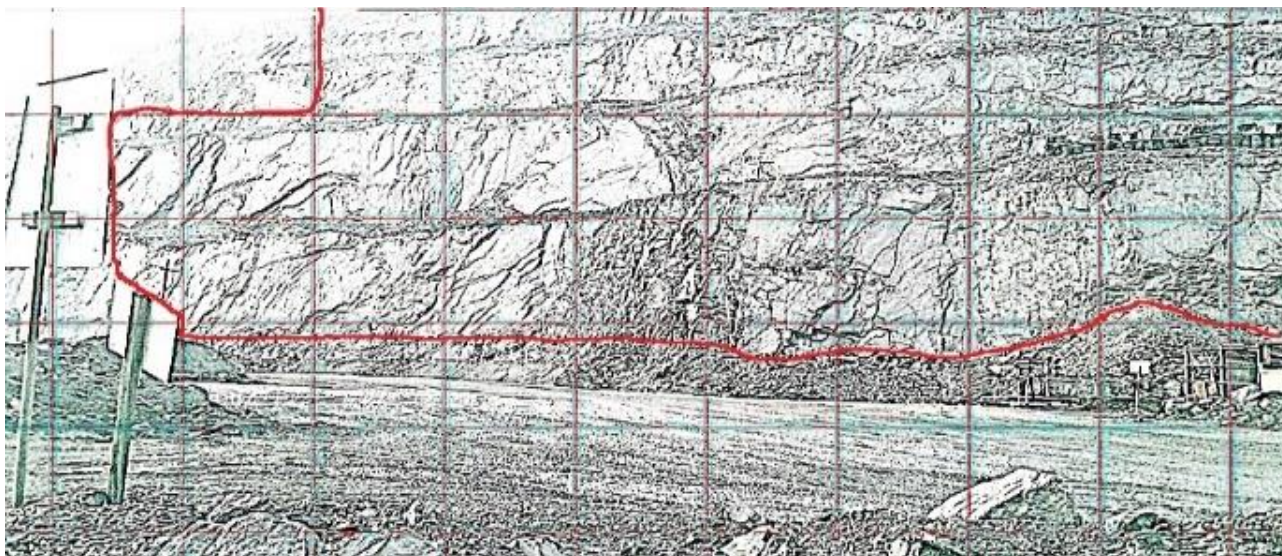


Рис. 3, б). Результат обробки фотознімку з відокремленням зони дослідження

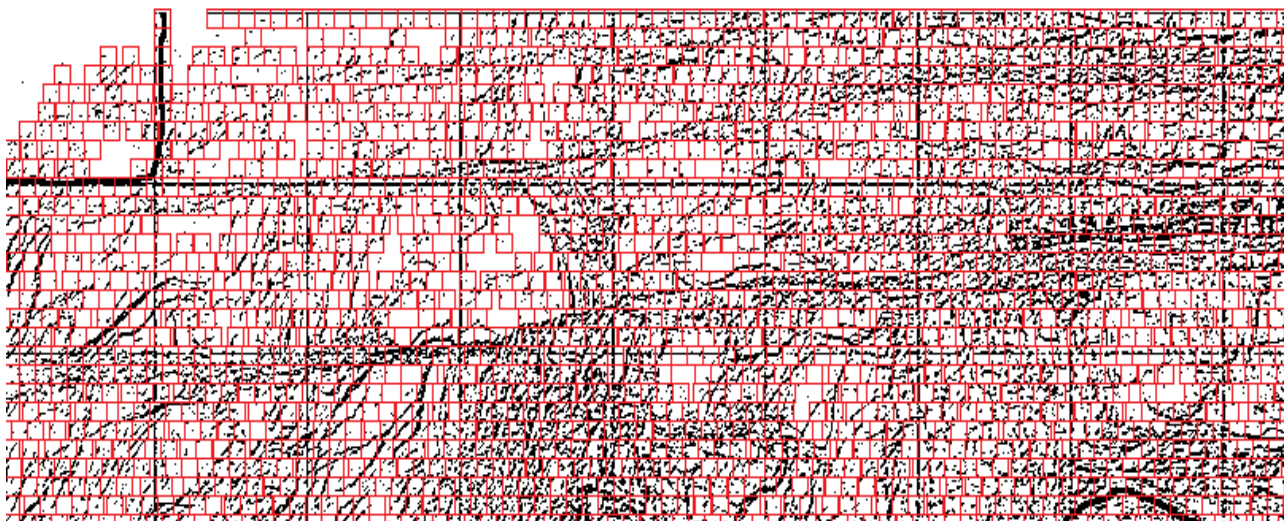


Рис. 3, в). Накладання сітки з найменшим розміром квадрата на відокремлену ділянку оголеного борту

Метод перекриття може бути вичерпним чи ні, в залежності від заданих параметрів налаштувань розрахунку. FracLac також сканує зображення, використовуючи додаткову функцію повороту, яка аналізує зображення з декількох точок різних видів і підсумовує результати.

FracLac автоматично генерує різні типи серій розмірів квадрата (наприклад, силові або лінійні). Крім того, локальні вимірювання можуть виконуватися на підрайонах зображень, щоб показати локальні зміни в певній зоні за наявності ознаки або ж більш глибоко, з використанням інструменту аналізу відтінку/кольору. Ці підрайони визначаються відповідно до вибору користувача, використовуючи ParticleAnalyzer плагіну ImageJ, квадратну сітку, розмір якої вибирається користувачем, випадково вибрані блоки або окремі пікселі.

Ріст фрактальної розмірності однозначно свідчить про збільшення порушеності об'єкта дослідження. Сітчаста фрактальна розмірність D розраховується по величині тангенса кута нахилу лінії до горизонталі, отриманої побудовою залежності [10]:

$$D = \frac{\ln N}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)}$$

де N – кількість квадратів, зайнятих тріщинами при кожному розмірі квадрату δ .

Для нерегулярних фракталів, фрактальна розмірність більше сітчастої фрактальної розмірності D , обчисленої по методу сітки, на одиницю, тобто:

$$d = D + 1.$$

Використовуючи метод сіток А.А. Матвеев [11] провів серію експериментів з визначення фрактальної розмірності деформованих зразків гірських порід і закономірностей (рис. 4) її зміни при зміні умов зовнішнього силового впливу на зразки.

Аналіз результатів цих досліджень показав, що деформування зразків супроводжується зародженням і розвитком (розгалуженням, злиттям й т.п.) тріщин. Взаємодіючі тріщини утворюють джерела порушень – кластери. Динаміку цього процесу розглядається як саморозвиток під дією навантаження кластерної структури гірських порід. У результаті встановлений стійкий нелінійний ріст фрактальної розмірності дефектів поверхні по мірі навантаження зразків гірських порід.

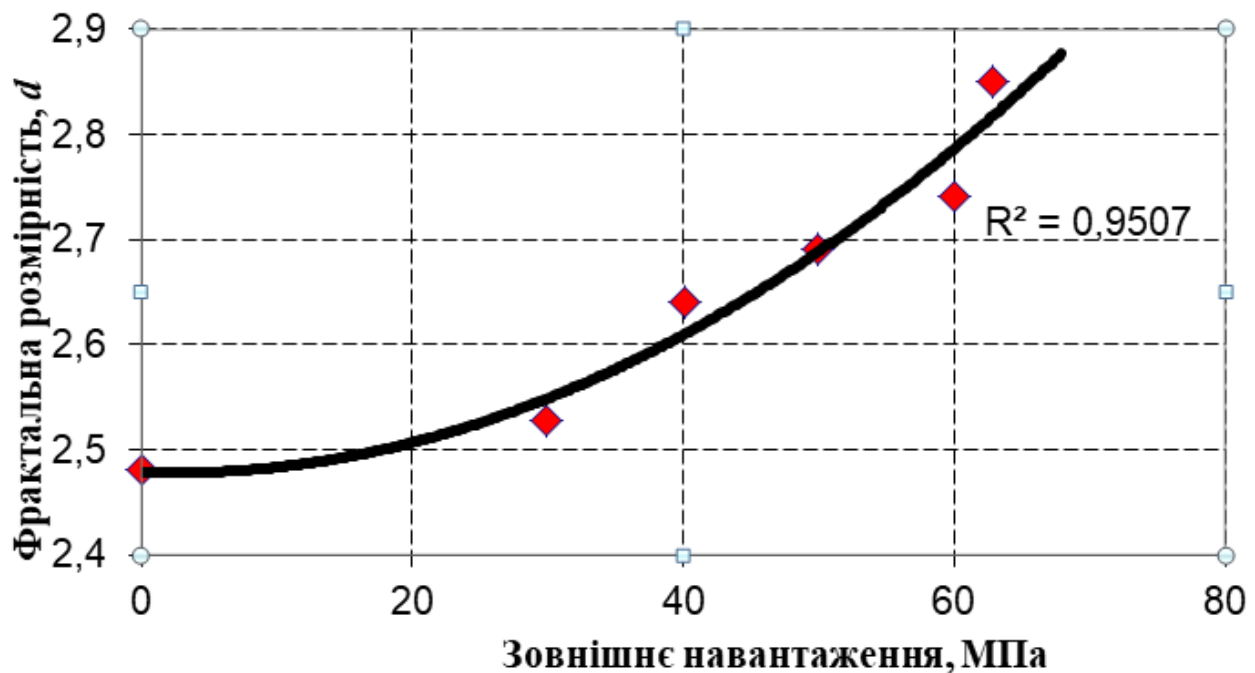


Рис. 4. Графік залежності фрактальної розмірності тріщин від зовнішнього навантаження на зразок

Для аналітичного опису залежності запропоновано наступний вираз [10]:

$$d = d_0 + k(\sigma^2 - m\sigma),$$

де d_0 – фрактальна розмірність поверхні вихідної гірської породи; σ – нормальна напруга; k , m – емпіричні коефіцієнти.

Коефіцієнт достовірності апроксимації (0,9507) даної залежності свідчить про статистичну надійність отриманого виразу. Відбувається зріст дефектності зразків при збільшенні зовнішнього навантаження, що відповідає сучасним уявленням про накопичення пошкоджень у ході руйнування гірських порід, а фрактальна розмірність є надійною оцінкою динаміки розвитку тріщин, що визначають міцнісні й деформаційні характеристики масиву.

При методі розрахунку фрактальної розмірності на основі зображення об'єкту "Box counting" виконується процес відбору квадратів або збору даних, який використовує для пошуку фрактальної розмірності шляхом підрахунку кількості зайнятих тріщинами квадратів при згущенні сітки та функції, відомої як лакуарність. Основна процедура полягає в систематичному накладанні серії сіток зменшуючи розмір сітки над зображенням та записом даних підрахунків для кожної наступної серії розрахунків [12,13].

Перед проведенням безпосередньо визначення фрактальної розмірності тріщин в масиві встановлювався загальний відсоток наявності тріщин на досліджуваній ділянці та виділено ділянки з загального масиву (рис. 5). За результатами підрахунку загальна площа тріщин, яка в подальшому приймала участь у розрахунку фрактальної розмірності, відносно площі вихідного масиву склала 17,715%. Це свідчить про підвищену тріщинуватість даної ділянки масиву і необхідність провести додаткові дослідження на ступінь порушеності.

Для цього, за допомогою наведеного вище способу, з використанням програми прикладних пакетів ImageJ виконувався підрахунок фрактальної розмірності з урахуванням відтінків сірого у вихідному знімку, розподілення шкали від 0 до 255 (рис. 5).

Як видно з рис. 5, найбільше розповсюдження набули тріщини середнього значення фрактальної розмірності, а верхня границя, якій відповідає значення 255 так і не була досягнута. Це свідчить про те, що масив хоча і порушений, але великих розривних порушень на ньому немає, тому дана ділянка борту відносно безпечна в плані стійкості, хоча повністю її оцінити по декільком уступам не можна. Для повної оцінки даної ділянки необхідно проводити повноцінний розрахунок з урахуванням, як геологічного складу борту, так і його геометричних параметрів.

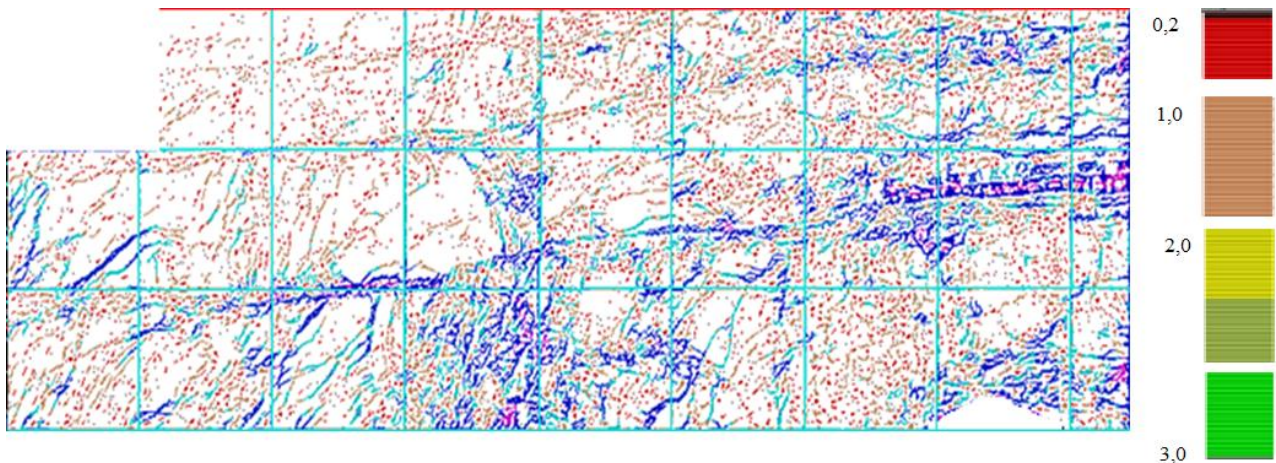


Рис. 5. Розподілення значень оцінки фракталу з урахуванням відтінків сірого

За результатами виконаної обробки даних фрактальна розмірність масиву для природної тріщинуватості породного укосу d склала 2,27.

Виконаними в даній роботі дослідженнями вперше отримана залежність коефіцієнта структурного ослаблення від фрактальної розмірності дефектів поверхні d :

$$k_c = 10^{(2-d) \cdot \lg \frac{V}{V_0}},$$

де V – ймовірний об’єм призми зрушення, який розраховується за виразом:

$$V = S \cdot l,$$

тут S – площа поверхні ковзання у перерізі, а l – протяжність ділянки борту, що береться до розрахунку; V_0 – об’єм характерного структурного блоку.

Для даної ділянки об’єм характерного структурного блоку прийнято (відповідає мінімальному розміру накладеного квадрату сітки) $0,02\text{м}^3$, а протяжність ділянки дослідження становить 71 м, при призмі обвалення 10 м площа поверхні ковзання на даній ділянці складає 446м^2 .

Тоді

$$k_c = 10^{(2-2,27) \cdot \lg \frac{71 \cdot 446}{0,02}} = 0,021189.$$

Таким чином, коефіцієнт структурного ослаблення для природної тріщинуватості борту кар’єру k_c склав 0,021. Результати, отримані для різних ділянок Інгулецького кар’єру, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Величини розрахункових зчеплень (C , т/м²) масиву гірських порід ділянок кар'єрного поля (при коефіцієнті тріщинуватості $a = 6-7$, $3_0 = 20-30$ і більш МПа) з коефіцієнтами запасу стійкості, рівними 1,0; 1,3; 2,0

Ділянка кар'єрного поля	H , м	W (а)	Розрахункова величина C , залежно від КЗС, т/м ²			Коефіцієнт структурного ослаблення
			1,0	1,3	2,0	
Вихідні характеристики тектонічної порушеності масиву гірських порід						
1. По тріщинуватості:			(22)	(16)	(10)	
- залізо-сланцевих горизонтів			18	14	9	
- магнетитових кварцитів			25	19	12	
2. По нашаруванню:						
- сланцевих горизонтів			16	12	8	
- залізистих горизонтів			16	12	8	
1. Східний борт						
1.1. Південна	600	2,86 (7)	81	62	40	0,019
1.2. Південна рудно-кристалічна товща	375	2,86 (6)	62	48	31	0,020
1.3. Центральна	810	2,86 (7)	86	66	43	0,018
1.4. Центральна рудно-кристалічна товща	600	2,86 (6)	64	49	32	0,022
1.5. Північна	585	2,86 (7)	88	68	44	0,019
1.6. Північна рудно-кристалічна товща	285	2,86 (6)	70	54	35	0,024
2. Західний борт						
1.1. Південна	630	2,70 (7)	94	73	47	0,019
1.2. Південна рудно-кристалічна товща	390	2,70 (7)	84	65	42	0,020
1.3. Центральна	585	2,70 (7)	96	74	48	0,019
1.4. Центральна рудно-кристалічна товща	285	2,70 (7)	90	70	45	0,021
1.5. Північна	345	2,70 (7)	86	66	43	0,020
1.6. Північна рудно-кристалічна товща	80	2,70 (7)	103	79	52	0,026

Таким чином було виконано третій етап роботи.

На останньому етапі виконано співставлення коефіцієнту структурного ослаблення, який розраховано за допомогою визначення фрактальної розмірно-

сті ділянок оголеного масиву за фотознімками з розрахунком за класичними методами, розбіжність коефіцієнту структурного ослаблення становить 5-10%. Це свідчить про задовільну збіжність і дозволяє використовувати дану експрес методику для оцінки тріщинуватості ділянки борту кар'єру через її фрактальну розмірність.

Таким чином, за допомогою створеної методики на основі даних фотозйомок можна оперативно оцінювати запас стійкості борту. Це твердження ґрунтується на тому, що коефіцієнт структурного ослаблення входить до механізму розрахунку коефіцієнту запасу стійкості. Так, при значенні фрактальної розмірності 2,27, коефіцієнт структурного ослаблення буде дорівнювати 0,021189, а відповідний коефіцієнт запасу стійкості ділянки борту 1 (див. рис. 2), з урахуванням його геометрії становитиме 1,56.

Висновки. 1. Встановлена залежність коефіцієнту структурного ослаблення порід від фрактальної розмірності тріщин на оголених ділянках борту дозволила створити експрес-методику, що дозволяє оперативно контролювати запас стійкості борту залізрудного кар'єру.

2. Порівняльний аналіз результатів розрахунків за традиційною методикою і за створеною експрес-методикою показав їх задовільну збіжність у 5-10%, що свідчить про практичну значимість представленої роботи.

Перелік посилань

1. Фисенко, Г.Л. (1965). *Устойчивость бортов карьеров и отвалов*. Недра.
2. Латышев, О. Г., Франц, В. В., Корнилков, М. В., & Соколов, В. В. (2016). Определение геометрических характеристик трещин для построения паспорта прочности горных пород. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, (1), 58-65.
3. *Избранные труды А.Ф. Иоффе Том 1. Механические и электрические свойства кристаллов*. (1974). Издательство «Наука»
4. Дунаев, В., Яницкий, Е., & Агарков, И. (2016). Изучение геолого-структурных условий эксплуатации месторождений как основа разработки мероприятий по закреплению уступов карьеров в скальных горных породах. *Инженерная защита*, (2), 110-116.
5. Голуб, В. В., Полищук, С. З., & Ветвицкий, И. Л. (2011). Новые подходы к оценке устойчивости откосов и склонов: теория и практика. *Днепропетровск: ЧМП «Экономика*.
6. Булат, А.Ф., & Дырда, В.И. (2005). *Фракталы в геомеханике*. Наук. думка.
7. Соколов, В. В., Капулкина, Д. В., Полянская, А. Э., & Латышев, О. Г. (2019). Постановка задачи прогноза устойчивости выработок в трещиноватых породных массивах. In *Международная научно-практическая конференция " Уральская горная школа-регионам"* (pp. 323-324).
8. Albers, D., & Anderson, G. L. (2008). *Mathematical people: Profiles and interviews*. CRC Press.
9. Рубцов, В. К. (1967). Расчет заданного выхода крупных и мелких кусков породы на карьерах *Сб. Взрывное дело*, 62/19, 84-99.
10. Щелокова, М. А., Слободян, С. Б., & Дырда, В. И. (2018). Фрактальный подход к механике разрушения твердых тел. *Геотехнічна механіка*, (138), 227-259.
11. Латышев, О. Г., Матвеев, А. А., Сынбулатов, В. В., & Строев, Ю. М. (2010). Оценка деформационных характеристик породного массива для прогноза устойчивости горных выработок. In *Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: труды III Междунар. конф., 19-21 мая* (p. 223-228)

12. Романенко, А.О., Кушнір, Є.Г., Кушнір, Е.Г., & Остапчук, А.О. (2019). Оцінка тріщинуватості гірського масиву через метод визначення фрактальної розмірності тріщин. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (5), 83-90.
13. Несмашный, Е. А., Ткаченко, Г. И., Болотников, А. В., & Романенко, А. А. (2015). Определение коэффициента структурного ослабления скального массива Ингулецкого карьера на основании фрактального анализа. *Вісник Криворізького національного університету*, (39), 113-117.

АННОТАЦИЯ

Целью данной статьи является разработка новой методики оценки запаса устойчивости участков бортов железорудного карьера.

Последовательность выполнения работы. Для достижения поставленной цели на первом этапе выполнялась фотосъемка высокого разрешения для характерных участков борта карьера с последующей компьютерной обработкой фотоснимков для оценки трещиноватости горных пород.

Следующим этапом был расчет фрактальной размерности участка массива по полученным снимкам с помощью программ ImageJ и FracLac, включающих пакет плагинов (дополнений) MicroMod2015.

Далее для дальнейшей оценки нарушенности массива за счет трещиноватости выполнялось исследование связи фрактальной размерности с коэффициентом структурного ослабления (этот коэффициент определяется классическим методом через соотношение прочности горных пород в массиве и в образце).

На последнем этапе работы после установления указанной связи и расчета коэффициента структурного ослабления пород по результатам определения фрактальной размерности выполнялась оценка запаса устойчивости участков бортов железорудного карьера. Для этого использовалась известная зависимость коэффициента запаса устойчивости от коэффициента структурного ослабления массива. В результате сравнения фрактальной размерности участков обнаженного массива по фотоснимкам с расчетом классическими методами, расхождение коэффициента структурного ослабления составило 5-10%. Это свидетельствует об удовлетворительной сходимости и позволяет использовать данную экспресс методику для оценки трещиноватости участка борта карьера на основе фрактальной размерности.

Научная новизна полученных результатов - впервые установлена аналитическая зависимость коэффициента структурного ослабления пород от фрактальной размерности трещин массива, что позволило упростить процедуру его расчета.

Практическая значимость работы заключается в создании новой методики оценки запаса устойчивости участков борту железорудного карьера на основе фрактального анализа трещиноватости пород.

Ключевые слова: карьер, устойчивость борту, трещиноватость, фрактальная размерность, коэффициент структурного ослабления, запас устойчивости борту.

ABSTRACT

The purpose of this article is to develop a new methodology for assessing the stability margin of iron ore opencast sides sections.

The sequence of work. To achieve this goal, at the first stage, high-resolution photography was carried out for characteristic sections of the pit wall, followed by computer processing of photographs to assess the fracturing of rocks. The next step was the calculation of the fractal dimension of the

array section from the obtained images using the ImageJ and FracLac programs, including the MicroMod2015 plug-in package (add-ons).

The next step was assess the disturbance of the massif due to fracturing, a study of the relationship between the fractal dimension and the coefficient of structural weakening was carried out (this coefficient is determined by the classical method through the ratio of the strength of rocks in the massif and in the sample).

At the last stage of the work, after establishing the specified connection and calculating the coefficient of structural weakening of rocks that based on the results of determining the fractal dimension, an assessment of the stability margin iron ore opencast sides sections that carried out. The known dependence of the stability safety factor on the coefficient of structural weakening of the array was used. As a result of comparing the fractal dimension of the exposed massif areas based on photographs with the calculation by classical methods, the discrepancy in the structural attenuation coefficient was 5-10%. This indicates a satisfactory convergence and allows the use of this express technique for assessing the fracturing of a section of a pit flank on the basis of fractal dimension.

The scientific novelty of the results obtained - for the first time, the analytical dependence of the structural weakening coefficient of rocks on the fractal dimension of the massif cracks was established, which made it possible to simplify the procedure for its calculation.

The practical significance of the work lies in the creation of a new methodology for assessing the stability margin of an iron ore opencast side sections that the basis of rock fractures fractal analysis.

Keywords: *quarry, board stability, fracture, fractal dimension, structural weakening coefficient, stock stability margin.*