

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО НАПРЯМУ РОЗВИТКУ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА ОСНОВІ ВРАХУВАННЯ ТЕНЗОРІВ ІНТЕНСИВНОСТІ ТРІЩИНУВАТОСТІ

Р. В. Соболевський, А. В. Камських, А. О. Криворучко

Житомирський державний технологічний університет

вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, 10005, Україна. E-mail: rvsobolevsky@rambler.ru

Виконано оцінку підходів до способів визначення просторової орієнтації тріщинуватості та планування напрямків розвитку гірничих робіт. Обґрунтовано методику досліджень і зазначені основні параметри для математичної моделі тріщинуватості покладу. Розроблено модель тріщинуватості покладів декоративного каменю, в основу якої покладено застосування тензорів інтенсивності тріщинуватості другого рангу. Обґрунтовано доцільність вираження тензорів інтенсивності тріщинуватості в обраній системі координат квадратною симетричною невідродженою матрицею. Обґрунтовано методику визначення напрямку розвитку гірничих робіт на основі порівняння тензорів тріщинуватості для різних значень кутів, утворених з віссю абсцис головними осями тензора інтенсивності тріщинуватості. Описано порядок визначення оптимальних розмірів моноліту.

Ключові слова: тріщинуватість, тензори, планування, видобування, камінь.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ТЕНЗОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Р. В. Соболевский, А. В. Камских, А. О. Криворучко

Житомирский государственный технологический университет

ул. Черняховского, 103, г. Житомир, 10005, Украина. E-mail: rvsobolevsky@rambler.ru

Выполнена оценка подходов к способам определения пространственной ориентации трещиноватости и планирования направлений развития горных работ. Обоснована методика исследований и указаны основные параметры математической модели трещиноватости залежи. Разработана модель трещиноватости залежей декоративного камня, в основе которой лежит применение тензоров интенсивности трещиноватости второго ранга. Обоснована целесообразность выражения тензоров интенсивности трещиноватости в выбранной системе координат квадратной симметричной невырожденной матрицей. Обоснована методика определения направления развития горных работ на основе сравнения тензоров трещиноватости для различных значений углов образованных с осью абсцисс главными осями тензора интенсивности трещиноватости. Описан порядок определения оптимальных размеров монолита.

Ключевые слова: трещиноватость, тензоры, планирование, добыча, камень.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. При розробці родовищ нерудних будівельних матеріалів при створенні проекту розробки та його уточненні на різних стадіях видобування уточнення напрямку розвитку видобувних і розкривних робіт має стратегічне значення для підприємства. Слід зазначити, що чинників, що впливають на ефективність видобування нерудної сировини, суттєва кількість. Тому доцільно розглядати кожний тип корисної копалини окремо. Так, для блочного декоративного каменю домінуючим критерієм однозначно є тріщинуватість покладу. Існує значна кількість різноманітних способів аналізу тріщинуватості та врахування їх впливу на видобувні роботи. Для розв'язання задач, що пов'язані з орієнтацією об'єктів у просторі, досить часто використовують методи тензорної алгебри. Тому актуальність урахування тензорів тріщинуватості при плануванні гірничих робіт є беззаперечною.

Мета роботи – дослідження ефективності планування гірничих робіт на родовищах декоративного каменю на основі врахування просторової орієнтації тензорів тріщинуватості.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Необхідно зазначити, що методи тензорної алгебри застосовувались досить часто для оцінки орієнтації тріщин. У [1] для оцінки анізотропної орієнтації тріщин застосовували тензорну трансформацію ефективних констант пружності на основі використання тензора щільності тріщин другого порядку.

Так, у [2] тензор тріщинуватості використовувався для прогнозування параметрів геометрії тріщин у масиві гірських порід. У роботі [3] тензорно-ймовірнісне моделювання анізотропії інтенсивності тріщинуватості й її середньоквадратичних відхилень дозволило визначити розміри природної окремоті та оцінити блочність масивів гірських порід.

Отже очевидно є ефективність застосування моделей тензорів тріщинуватості для прогнозування параметрів просторової орієнтації тріщин, форми та розмірів природної окремоті, що може бути використано при плануванні видобувних робіт. У [4] досліджувалась методика планування розробки покладу декоративного каменю для одержання блочної продукції на основі результатів заміру тріщинуватості. У [5] розглядалися підходи до планування видобувних робіт для високоблочних родовищ мрамору. На основі моделювання систем тріщин і розривів в [6] оцінена блочність покладу, значення якої дозволили прийняти рішення про вибір оптимального напрямку розвитку гірничих робіт. У [7] виконано геостатистичне моделювання ефективності видобування блочного каменю при застосуванні різання. У [8] досліджено вплив різних підходів до орієнтації фронту робіт на економічну ефективність видобування блоків. Вивчення параметрів природної тріщинуватості на основі використання стереофотограмметричних вимірювань у [9] дозволило виконати оцінку економічної ефективності видобування блоків при різних підходах до орієнтації фронту

робіт. У [10] розглянуті деякі аспекти впливу природних чинників на втрати сировини декоративного каменю. У [11] для планування гірничих робіт запропоновано використовувати кластерний аналіз тріщинуватості покладів декоративного каменю. Слід зазначити, що всі вищезгадані підходи до планування гірничих робіт не дозволяють однозначно вибрати оптимальний напрямок розвитку, що зумовлено складністю об'єктивної оцінки орієнтації тріщинуватості покладу. Цей недолік можна буде усунути на основі використання апарату тензорної алгебри.

Отже, очевидною є проблема врахування тензорів інтенсивності тріщинуватості для обґрунтування раціонального напрямку розвитку гірничих робіт під час видобування декоративного каменю.

При моделюванні розглядався випадок, коли в масиві розвинені $n+1$ система тріщин. У більшості випадків це декілька систем (2–4) різноорієнтованих вертикальних тріщин і одна система пластових (звичайно горизонтальних) тріщин. Різноорієнтовані вертикальні тріщини при перетині з пластовими тріщинами утворюють замкнені багатокутники. Тоді окремі будуть багатогранниками, основою яких є пластові тріщини. У цьому випадку для визначення оптимального напрямку розробки кар'єру при відкритому способі розробки родовища облицювального каменю достатньо знайти рішення в двовимірному випадку, тобто основний вплив на напрям розробки кар'єру мають вертикальні тріщини в масиві гірничої породи.

Отже, з цього випливає, що для визначення оптимального напрямку розвитку гірничих робіт на кар'єрах облицювального каменю потрібно між вертикальними тріщинами вписати прямокутник з оптимальними сторонами і напрям розвитку гірничих робіт співпадає з напрямом меншої сторони прямокутника. Тоді задача зводиться до знаходження напрямку меншої сторони даного прямокутника, вписаного між вертикальними тріщинами в площині пластової тріщини.

Для цього дослідимо і математично опишемо системи вертикальних тріщин.

Будь-яка система тріщин характеризується орієнтуванням сукупності площин, які її утворюють, і частотою тріщин (ω). Побудуємо вектор, що відбиває ці чинники й ототожнимо його із системою тріщин.

Обґрунтуємо основні терміни та визначення, які будемо використовувати в подальшому моделюванні.

Прямою системи тріщин назвемо пряму, орієнтування якої в просторі визначається середнім положенням прямих, утворених перетином площин, що утворюють систему, з пластовою площиною.

Вектором прямої системи тріщин назвемо вектор, перпендикулярний прямій системи тріщин, модуль якого дорівнює частоті тріщин системи.

Під частотою тріщин будемо розуміти середню кількість тріщин на погонний метр (або на одиницю довжини) розрізу в напрямку перпендикулярному даній системі.

Інтенсивністю тріщинуватості будемо називати середню кількість тріщин на погонний метр (або на одиницю довжини) розрізу в будь-якому напрямку.

Для опису тріщини розглянемо пряму, яку можна переміщати паралельним переносом у будь-яку частину пластової (горизонтальної) тріщини. При цьому орієнтація прямої в просторі не змінюється й однозначно визначається кутом φ нахилу прямої до осі абсцис Ox .

Паралельним переносом перемістимо тріщину на площині так, щоб вона проходила через початок системи координат Oxy .

Тоді, нормальне рівняння прямої системи тріщин буде описуватись виразом:

$$x \cos(\varphi) + y \sin(\varphi) = 0, \quad (1)$$

коефіцієнти якого є компонентами одиничного вектора (орта) нормалі до тріщини

$$\bar{n} = (\cos(\varphi), \sin(\varphi)), \quad (2)$$

і $\bar{n} = 1$.

Нормальний орт \bar{n} (2) виражається через кут φ нахилу прямої і повністю визначає її орієнтацію на площині. Тому замість тріщини будемо розглядати її геометричний еквівалент – нормальний (перпендикулярний до тріщини) орт \bar{n} .

Будь-яка система тріщин характеризується орієнтуванням сукупності тріщин, її утворюючих, і частотою тріщин (ω). Побудуємо вектор, що відображає ці чинники й ототожнимо його із системою тріщин.

Складемо нормальні рівняння усіх прямих системи й одержимо загальне рівняння прямої системи

$$[\cos(\varphi)]x + [\sin(\varphi)]y = 0, \quad (3)$$

де використано позначення

$$\begin{aligned} [\cos(\varphi)] &= \sum_{j=1}^N \cos(\varphi)^j; \\ [\sin(\varphi)] &= \sum_{j=1}^N \sin(\varphi)^j, \end{aligned} \quad (4)$$

де j – номер тріщини; N – кількість тріщин системи.

Загальному рівнянню прямої системи (3) відповідає її нормальний вектор

$$\bar{N} = ([\cos(\varphi)]; [\sin(\varphi)]). \quad (5)$$

Розділимо загальне рівняння (3) на модуль

$$|\bar{N}| = \sqrt{[\cos(\varphi)]^2 + [\sin(\varphi)]^2}, \quad (6)$$

і одержимо нормальне рівняння прямої системи:

$$\frac{[\cos(\varphi)]}{|\bar{N}|}x + \frac{[\sin(\varphi)]}{|\bar{N}|}y = 0, \quad (7)$$

коефіцієнти якого є координатами нормального орта прямої системи

$$\bar{n} = \frac{\bar{N}}{|\bar{N}|} = \frac{([\cos(\varphi)]; [\sin(\varphi)])}{\sqrt{[\cos(\varphi)]^2 + [\sin(\varphi)]^2}}. \quad (8)$$

Тоді, відповідно до визначення, вектор $\bar{\omega}$ є вектором системи тріщин:

$$\bar{\omega} = \omega \bar{n}. \quad (9)$$

Дійсно, вектор $\bar{\omega}$ (9) характеризується такими властивостями:

- 1) перпендикулярний прямій системи тріщин, отже він визначає орієнтування системи на площині;
- 2) його модуль $\bar{\omega} = \omega \bar{n} = \omega$ дорівнює частоті тріщин ω системи.

Нехай у масиві гірничих порід розвинені n систем вертикальних тріщин, де $i = 1, 2, \dots, n$ – номер i -ої системи тріщин, і виконано по N_i вимірів елементів тріщин в i -ій системі тріщин, де $j = 1, 2, \dots, N_i$ – номер j -го виміру в i -ій системі тріщин.

Позначимо через φ_i^j кут нахилу прямої до осі абсцис Ox j -го виміру прямої тріщини в i -ій системі тріщин і ω_i^j частота j -го виміру i -ої системи тріщин.

Ототожнимо i -ту систему тріщин з випадковим вектором системи тріщин $\bar{\omega}_i = \omega_i \bar{n}_i$, характеристики якого (математичне очікування, дисперсія) будемо визначати за вимірами показників системи в точках масиву гірничих порід, що досліджується.

Кожній множині вимірів елементів i -ої системи тріщин в j -ій точці φ_i^j за виразами (2) і (9) відповідають значення випадкового вектора:

$$\bar{\omega}_i^j = \omega_i^j (x_i^j; y_i^j), \quad (10)$$

де $x_i^j = \cos(\varphi_i^j)$, $y_i^j = \sin(\varphi_i^j)$.

$$[L^2(\bar{e})] = \bar{e} L \bar{e}^T = (\cos(\alpha); \sin(\alpha)) \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n [\omega_{xi}]^2 & \sum_{i=1}^n [\omega_{xi}] \cdot [\omega_{yi}] \\ \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2 \cdot [\omega_{xi}] & \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2 \end{vmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

де

$$L = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n [\omega_{xi}]^2 & \sum_{i=1}^n [\omega_{xi}] \cdot [\omega_{yi}] \\ \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2 \cdot [\omega_{xi}] & \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Це тензор другого рангу квадратичних значень інтенсивності тріщинуватості, виражений у вибраній системі координат квадратною симетричною невідродженою матрицею.

Головні осі тензора L визначають екстремальні напрями середньоквадратичних значень інтенсивності тріщинуватості на родовищі облицювального каменю $\sqrt{[L^2(\bar{e})]}$, а головні значення – це екстре-

$$\lambda_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n [\omega_{xi}]^2 + \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n [\omega_{xi}]^2 - \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2)^2}{4} - (\sum_{i=1}^n [\omega_{xi}] \cdot [\omega_{yi}])^2}. \quad (17)$$

Головним (власним) значенням тензора L $\lambda_{1,2}$, відповідно до теорії тензорної алгебри, відповідають

Математичним сподіванням або середнім значенням випадкового вектора $\bar{\omega}_i$ i -ої системи тріщин на основі виразів (8) і (9) буде математична залежність

$$M \bar{\omega}_i = \frac{[\omega_i]}{N_i} \bar{n}_i = \frac{[\omega_i]([x_i]; [y_i])}{N_i \sqrt{[x_i]^2 + [y_i]^2}}, \quad (11)$$

де

$$[\omega_i] = \sum_{j=1}^{N_i} \omega_i^j; [x_i] = \sum_{j=1}^{N_i} x_i^j; [y_i] = \sum_{j=1}^{N_i} y_i^j. \quad (12)$$

Інтенсивність тріщинуватості в напрямку орта \bar{e} , де $\bar{e} = (\cos(\alpha), \sin(\alpha))$, $|\bar{e}| = 1$, α – це кут між віссю абсцис Ox та ортом i $0 \leq \alpha < 2\pi$, створену n системами тріщин запишемо через суму:

$$L(\bar{e}) = \sum_{i=1}^n |M \bar{\omega}_i \bar{e}| = \sum_{i=1}^n \frac{[\bar{\omega}_i][x_i] \cos(\alpha) + [y_i] \cos(\alpha)}{N_i \sqrt{[x_i]^2 + [y_i]^2}}. \quad (13)$$

Для розв'язання проблеми визначення напрямку розвитку гірничих робіт на кар'єрах облицювального каменю перейдемо до квадратичних значень інтенсивності тріщинуватості, які аналітично описуються функціями, які є диференційованими у всій області визначення.

Після піднесення до квадрату лівої й правої частин (13), просумуємо за всіма системами тріщин і виразимо в тензорній формі, залежне від напрямку $|\bar{e}|$, квадратичне значення інтенсивності тріщинуватості, породженої n системами тріщин:

маленькі величини інтенсивностей тріщинуватості по головних напрямках.

Головні значення тензора L (15) є розв'язками (коріннями) його характеристичного рівняння:

$$\Delta(\lambda) = \lambda^2 - \left(\sum_{i=1}^n [\omega_{xi}]^2 + \sum_{i=1}^n [\omega_{yi}]^2 \right) \lambda + \det L = 0, \quad (16)$$

де $\det L$ – визначник матриці L .

Розв'язуючи характеристичне рівняння (16), знайдемо головні (власні) значення тензора L , які належать множині дійсних чисел, що впливає із симетричності матриці L , і рівні екстремумам середньоквадратичних значень інтенсивності тріщинуватості $\sqrt{[L^2(\bar{e})]}$:

орти, які визначають напрямки головних осей тензора L :

$$\vec{e}'_i = \left(\frac{\Delta_{xi}}{|\vec{u}_i|}, \frac{\Delta_{yi}}{|\vec{u}_i|} \right), i = 1, 2, \quad (18)$$

$$\text{де } |\vec{u}_i| = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2}, \quad (19)$$

Орти \vec{e}'_i взаємно ортогональні одиничні вектори в просторі. Вони задовольняють наступній умові:

$$\vec{e}'_i \cdot \vec{e}'_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо } i \neq j, \end{cases} i, j = 1, 2, 3, \quad (20)$$

і відповідно позначимо φ_1, φ_2 – кути утворенні з віссю Ox головними осями Ox', Oy' тензора L .

Запропонована методика була реалізована для умов Сліпчицького родовища габро-нориту. З цією метою було виконано визначення орієнтації тріщин в масиві та виконане визначення їх просторового положення за результатами визначення положення окремих тріщин на картах тріщинуватості та результатів безпосереднього вимірювання окремих тріщин в масиві. Одержані результати дали можливість побудувати тензори інтенсивності тріщинуватості, які при інтерполюванні дають можливість спрогнозувати напрямки протікання магми в період формування родовища (рис. 1).

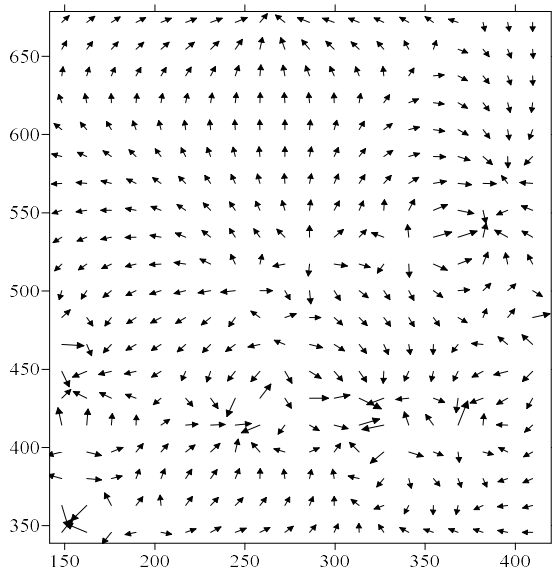


Рисунок 1 – Тензори інтенсивності тріщинуватості для Сліпчицького родовища габро-нориту

Тоді напрям розвитку гірничих робіт на кар'єрах облицювального каменю буде визначатися з порівняння:

– якщо $L(\varphi_1) < L(\varphi_2)$, то розвитку гірничих робіт на кар'єрах облицювального каменю краще проводити в напрямку φ_2 ,

– якщо $L(\varphi_1) > L(\varphi_2)$, то в напрямку φ_1 .

Урахувавши той факт, що технологія видобування блоків у більшості випадків забезпечує максимальний вихід блоків у випадку, коли напрям робіт перпендикулярний до більшої сторони прямокутника вписаного між вертикальними тріщинами, можна

прийняти сторони прямокутника рівними відповідно $\frac{1}{L(\varphi_1)}$ і $\frac{1}{L(\varphi_2)}$, для випадку утворення з віссю Ox кутів φ_1 і φ_2 , тобто, площа оптимального моноліту може бути визначена з виразу:

$$S = \frac{1}{L(\varphi_1)} \cdot \frac{1}{L(\varphi_2)}.$$

ВИСНОВКИ. У результаті виконаних досліджень одержані такі результати:

1. Розроблена математична модель тріщинуватості покладів декоративного каменю, в основі якої лежить застосування тензорів інтенсивності тріщинуватості другого рангу.

2. Обґрунтовано доцільність вираження тензорів інтенсивності тріщинуватості у вибраній системі координат квадратною симетричною невідродженою матрицею.

3. Обґрунтовано методику визначення напрямку розвитку гірничих робіт на основі порівняння тензорів тріщинуватості для різних значень кутів утворення з віссю абсцис головними осями тензора інтенсивності тріщинуватості.

4. Описано порядок визначення оптимальних розмірів моноліту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kachanov M., Sayers C.M. Simple technique for finding effective elastic constants of cracked solids for arbitrary crack orientation statistics // *International Journal of Solids and Structures*. – 1991. – № 27. – С. 671–680.
2. Pan J.B., Lee C.C., Lee C.H., Yeh, H.F., Lin H.I. Application of fracture network model with crack permeability tensor on flow and transport in fractured rock // *Engineering Geology*. – 2010. – № 116. – С. 166–177.
3. Редькин Г.М. Показатели структурной раздробленности массивов горных пород бюллетень: научно-технический журнал. – 2009. – № 12. – С. 219–224.
4. Alade S., Muriana O., Olayinka H. Modified volumetric joint count to check for suitability of granite outcrops for stone // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2012. – № 7. – С. 646–660.
5. Elci H., Turk N. Rock mass block quality designation for marble production // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2014. – № 69. – С. 26–30.
6. Ülker E., Turanboy A. Maximum volume cuboids for arbitrarily shaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis // *A genetic algorithm approach. Computers & Geosciences*. – 2009. – № 65. – С. 1470–1480.
7. Fernández-de Arriba M. A computational algorithm for rock cutting optimization from primary blocks // *Computers and Geotechnics*. – 2013. – № 50. – С. 29–40.
8. Mutlutürk M. Determining the amount of marketable blocks of stone before actual extraction // *Journal of mining science*. – 2007. – № 43. – С. 67–72.
9. Levytsky V.H., Sobolevsky R.V. Decorative stone block quality control based on surface digital photogrammetry // *Scientific Bulletin of National Min-*

ing University. – 2014. – № 6. – С. 58–66.

10. Korobiichuk I., Nowicki M. etc. The study of corrosion resistance of Pokostivskiy gran-odiorites after processing by various chemical and me-chemical methods // *Construction & Building Materials*. – 2016. – № 114. – С. 241–247.

11. Sobolevskiy R., Korobiichuk I., Nowicki M.,

Szewczyk R. Using cluster analysis for planning mining operations on the granite quarries // 16 th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. – 2016. – Book 1, 2. – PP. 263–270.

JUSTIFICATION OF THE RATIONAL DIRECTION OF MINING DEVELOPMENT BASED ON THE ACCOUNT OF FRACTURING INTENSITY TENSORS

R. Sobolevskiy, O. Kamskykh, A. Krivoruchko

Zhytomyr State Technological University

vul. Cherniakhovskogo, 103, Zhytomyr, 10005, Ukraine. E-mail: rvsobolevsky@rambler.ru

Purpose. To determine the direction of mining operations development for extraction of the decorative stone based on the accounting of the tensors of fracturing intensity. **Methodology.** For modeling the spatial distribution of the fracturing intensity the tensors of the fracturing intensity of the second rank have been used expressed by the square symmetric non-degenerate matrix. **Results.** The approaches estimation to the ways of evaluation the spatial orientation of fractures and planning the directions of mining operations has been done. The methodology of research and the basic parameters for the mathematical model of the fracturing deposit have been justified. The model of the fracturing deposits of decorative stones has been developed. This model is based on the using of tensors of the fracturing intensity of the second rank. The expediency of expression the tensors of the fracturing intensity in the selected coordinate system by the square symmetric non-degenerate matrix has been justified. The methodology of determining the direction of development mining operations based on comparison of fracturing tensors for different values of the angles formed with the abscissa of principal axes of the tensor of the fracturing intensity has been justified. A procedure for determining the optimal size of the natural separateness of decorative stones has been described. **Originality.** The methodology of determining the direction of development mining operations based on comparison of fracturing tensors for different values of the angles formed with the abscissa of principal axes of the tensor of the fracturing intensity was justified for the first time. **Practical value.** Research results are allowed to justify the choice of the direction of development mining operations and optimal sizes of the natural separateness of decorative stones. References 11, figure 1.

Key words: fracturing, tensors, planning, mining, operations, stones.

REFERENCES

1. Sayers, C.M., Kachanov, M. (1991), “A simple technique for finding effective elastic constants of cracked solids for arbitrary crack orientation statistics”, *International Journal of Solids and Structures*, iss. 27, vol. 6, pp. 671–680.

2. Pan, J.B., Lee, C.C., Lee, C.H., Yeh, H.F., Lin, H.I. (2010), “Application of fracture network model with crack permeability tensor on flow and transport in fractured rock”, *Engineering Geology*, vol. 116, pp. 166–177.

3. Redkin, G.M. (2009), “Indicators of structural fragmentation of rock massifs”, *Mining informational and analytical bulletin*, vol. 12, pp. 219–224.

4. Alade, S., Muriana, O., Olayinka, H. (2012), “Modified volumetric joint count to check for suitability of granite outcrops for stone production”, *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 7, pp. 646–660.

5. Elci, H., Turk, N. (2014), “Rock mass block quality designation for marble production”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 69, pp. 26–30.

6. Ülker, E., Turanboy, A. (2009), “Maximum volume cuboids for arbitrarily shaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis”, *A genetic algo-*

rithm approach. Computers & Geosciences, vol. 65, pp. 1470–1480.

7. Fernández-de Arriba, M. (2013), “A computational algorithm for rock cutting optimization from primary blocks”, *Computers and Geotechnics*, vol. 50, pp. 29–40.

8. Mutlutürk, M. (2007), “Determining the amount of marketable blocks of stone before actual extraction”, *Journal of mining science*, vol. 43, pp. 67–72.

9. Levytsky, V.H., Sobolevsky, R.V. (2014), “Decorative stone block quality control based on surface digital photogrammetry”, *Scientific Bulletin of National Mining University*, vol. 6, pp. 58–66.

10. Korobiichuk, I., Korobiychuk, V., Nowicki, M., Shamrai, V., Skyba, G., Szewczyk, R. (2016), “The study of corrosion resistance of Pokostivskiy granodiorites after processing by various chemical and mechanical methods”, *Construction & Building Materials*, 114, pp. 241–247.

11. Sobolevskiy, R., Korobiichuk, I., Nowicki, M., Szewczyk, R. (2016), “Using cluster analysis for planning mining operations on the granite quarries”, *16th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining*, Book 1, 2, pp. 263–270.

Стаття надійшла 12.12.2017.