

## **СТЕПЕНЬ ОРИЕНТИРОВАННОСТИ ДЕФЕКТОВ СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД И ХАРАКТЕР ИХ РАЗРУШЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК**

Вивчено вплив орієнтованості дефектів будови кристалічних порід на характер їхнього руйнування під дією динамічних і статичних навантажень. Встановлено, що при високому ступені орієнтованості внутрішньозернових мікротріщин істотно зростає обсяг дрібних пиловидних фракцій при динамічному (вибуховому) навантаженні і збільшується відсоток виходу монолітних блоків декоративного каменю при їхньому відділенні від масиву статичними навантаженнями – вибухом зарядів димного пороху.

## **DEGREE DIMENSIONAL ORIENTATION OF CRYSTALLINE ROCKS DEFECTS CONSTITUTION AND CHARACTER OF THEIR DESTRUCTION UNDER OPERATION OF LOADS**

The influence dimensional orientation of crystalline rocks constitution defects on character of their destruction under operation dynamic and statically loads is studied. Is established, that at a high scale dimensional orientation of intragranular microfractures volume of small-sized pulverous fractions essentially increases at dynamic (explosive) loading and percentage of an output exit of monolithic blocks of a decorative stone is augmented at their extraction from the array by static loading – explosion of a charge of black powder.

В полиминеральных средах, какими являются большинство кристаллических пород, пространственное положение дефектов минеральных зерен (плоскостей микротрещин, спайности, двойникования и трансляционного скольжения) может быть определено в тонких, толщиной 20-30 мкм срезах – прозрачных петрографических шлифах – Федоровским методом [1] с помощью универсального столика микроскопа типа ФС-5.

Данные замеров ориентировки дефектов строения минералов (микротрещин) принято изображать в виде структурных ориентирных диаграмм [2], для составления и интерпретации которых разработаны методы, базирующиеся на применении теории вероятностей и математической статистики [3,4]. Для определения степени ориентированности дефектов строения обычно применяют векторный метод Брайча [4], который позволяет надежно определять степень ориентированности по нескольким критериям, как при малом (менее 20), так и при большом числе замеров (200 и более).

Однако при реализации данного метода, помимо большого объема вычислений, необходимо выполнить довольно сложные графические построения на сетке равнопромежуточной стереографической проекции (сетке Каврайского). Поэтому при исследовании степени ориентированности дефектов строения минеральных зерен, когда число замеров координат исследуемых направлений обычно намного больше 20, применялся более упрощенный метод.

Сущность данного метода заключалась в том, что при анализе обычной структурной точечной диаграммы, где точками изображались координаты плоскостей дефектов строения исследуемого минерала, вначале осуществлялся контроль наличия ориентировки. Для этого поле диаграммы с нанесенными данными разбивался при помощи сетки Каврайского на 24 равноплощадных

треугольника, затем определялась величина  $\chi_v^2$  (критерий Пирсона) по формуле, приведенной в работе [3]

$$\chi_v^2 = \frac{L}{N} \sum_{i=1}^L (n_i - N/L)^2, \quad (1)$$

где  $N$  – число наблюдений (точек) на поле диаграммы;  $L$  – число выделенных равноплощадных треугольников;  $n_i$  – число точек в исследуемом треугольнике;  $v$  – число степеней свободы  $v = L-1$ .

За критерий наличия ориентировки при  $v = 23$  принято число, равное 33. Считают [3], что если  $\chi_{23}^2$  меньше этого значения, то ориентировка дефектов строения отсутствует, поскольку распределение изотропное. При значениях  $\chi_{23}^2$  больших, чем 33 на структурной диаграмме выполняют необходимые вычисления, изображают узор ориентировки и производят анализ узора, с целью определения среднестатистических координат плоскостей наибольшего ослабления внутренних связей в исследуемом минерале.

Чем больше значение  $\chi_v^2$ , тем выше степень ориентированности дефектов строения минеральных зерен. Величина  $\chi_v^2$  является, таким образом, критерием, определяющим степень ориентированности дефектов строения горной породы.

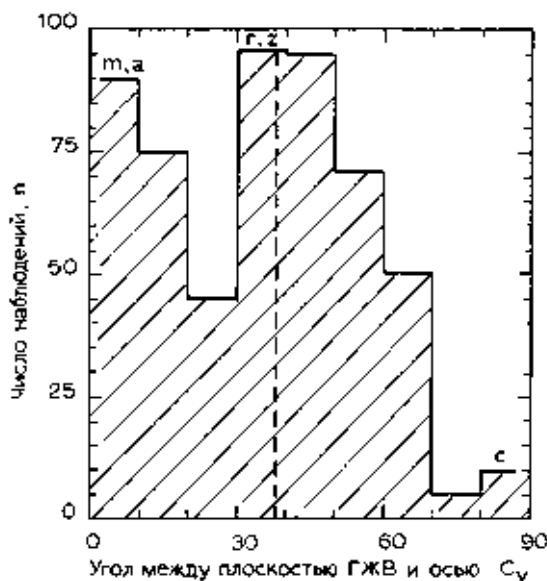
Степень ориентированности дефектов строения была изучена для гранитов, габбро-диабазов, железистых кварцитов, песчаников, известняков и доломитов. В кварцсодержащих породах (гранитах, железистых кварцитах и песчаниках) в качестве минерала-индикатора, по которому можно определять степень ориентированности дефектов строения, использовался кварц. Это связано с тем, что под микроскопом с помощью столика Федорова легко устанавливаются координаты его оптической оси  $C_v$ , а дефекты строения кварца в виде многочисленных плоскостей газовой-жидких включений (ГЖВ), по сути «залеченные микротрещины, пространственно жестко связаны с данным кристаллографическим направлением. Таким образом, установив среднестатистические координаты оптической оси в кварце, можно в общих чертах получить представление о характере распределения в пространстве дефектов строения в кварцсодержащих породах и степени их ориентированности.

В процессе исследований было установлено, что до 38 % микротрещин в кварце располагаются субпараллельно граням призм  $t$  и  $a$ , 57 % – параллельно граням ромбоэдров  $r$  и  $z$  и 5 % – параллельно плоскости базопинакоида  $c$  (рис.1).

В работах [8,9] отмечено, что при воздействии на породу нагрузок (динамических, статических, термических) разрушения в кварце контролируются именно этими кристаллографическими направлениями.

В бескварцевых породах, или где содержание кварца очень небольшое, т. е. менее 1-2 % (например, в габбро-диабазе), минералом-индикатором для определения степени ориентированности служил плагиоклаз, содержащий наибольшее количество интрагранулярных (внутризерновых) микротрещин по

сравнению с другими породообразующими минералами (пироксеном и флогопитом).



*m, a* – грани призм; *r, z* – грани ромбоэдров; *c* – грани базопинакоида

Рис. 1 – Распределение «залеченных» трещин в кварце относительно его оптической оси  $C_v$  для гранитов

Так как этот минерал оптически двухосный, а для установления величины  $\chi_v^2$  желательно иметь пространственное распределение одного параметра, то в шлифах определялись координаты биссектрисы острого угла между оптическими осями или координаты нормалей (полюсов) к плоскостям интрагранулярных микротрещин.

После нанесения фигуративных точек вышеназванных параметров вычислялась степень их ориентированности по формуле 1.

В практически бездефектных породах, таких, как известняки и доломиты, где дефекты строения в породообразующих минералах (кальците и доломите) наблюдаются в основном в виде двойниковых плоскостей, (т.е. нарушений структуры без разрыва сплошности), измерялись координаты нормалей к этим плоскостям, по распределению которых в пространстве вычислялась затем степень ориентированности пород по внутреннему строению.

Для установления плотности дефектов строения в минеральных зернах использовался микроскоп МП-2 с увеличением от  $100\times$  до  $500\times$ , укомплектованный интеграционным столиком типа ИСА, конструкция которого давала возможность автоматизировать этот процесс.

Результаты исследования плотности дефектов строения (ед/см<sup>3</sup>) и степени их ориентированности ( $\chi_{23}^2$ ) в горных породах приведены в табл. 1.

Плотность дефектов строения и степень их ориентированности в породообразующих минералах горных пород в общем случае зависят от особенностей

механизма деформирования массивов в неоднородном силовом поле напряжений. Чем больше односторонние сжимающие усилия (стресс), тем больше степень ориентированности породы по внутреннему строению.

Таблица 1 – Плотность дефектов строения и степень их ориентированности в породах различного генезиса

Наименование Породы	Плотность дефектов строения, ед/см <sup>3</sup>	Степень ориентированности $\chi^2$ при 23 степенях свободы
Граниты	$2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$	50-180
Габбро-диабазы	$5 - 2 \cdot 10^3$	70-120
Железистые кварциты	$1 - 10^2$	150-295
Песчаники	$1 - 10^2$	54-190
Известняки, доломиты	$2 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$	24-32

В процессе образования микротрещин в зернах кварца в условиях стресса большое количество микротрещин, наблюдение которых возможно лишь при помощи сканирующего электронного микроскопа [5], возникает параллельно генеральному направлению оптически различимой интрагранулярной микротрещины. Объемная плотность таких мельчайших дефектов строения и степень их ориентированности прямо пропорционально величине односторонних сжимающих усилий. Ввиду высокой объемной плотности дефектов строения кварца при взрывном разрушении кварцосодержащих пород наблюдается, как правило, очень большой выход мельчайших пылевидных фракций [6].

Следует отметить, что установление количественного соотношения между степенью ориентированности дефектов строения и выходом пылевидных фракций при динамических нагрузках на горные породы является достаточно сложной задачей по нескольким причинам.

Во-первых, исследуемые породы должны иметь примерно одинаковый минералогический состав и, во-вторых, незначительно отличаться друг от друга по структуре (размерам минеральных зерен) и физико-механическим свойствам. Таким требованиям отвечают граниты, массивы которых, несмотря на различный геологический возраст, имеют большое сходство в плане их структурных особенностей [7].

Были изучены данные, полученные при взрывном разрушении навесками тэна цилиндрических образцов (кернов), отобранных из трех гранитных массивов – Кудашевского, Токовского и Мокромосковского. Граниты этих массивов характеризовались среднезернистой структурой и имели примерно одинаковый минералогический состав, однако существенно отличались друг от друга степенью ориентированности по внутреннему строению, то есть величиной  $\chi_v^2$  (табл.2).

Гранулометрия пылевидных фракций (0-50мкм) с помощью микроскопа и анализ кумулятивной кривой грансостава показал, что средний размер мельчайших кварцевых частиц, разрушенных взрывом гранитов, нелинейно уменьшается с увеличением степени ориентированности гранитов по внутреннему строению (рис.2).

Таким образом, объем образовавшейся при динамических (взрывных) нагрузках мельчайшей пыли в значительной мере зависит от степени ориентированности дефектов строения кристаллических полиминеральных сред и этот фактор необходимо учитывать при разработке экологически безопасных способов взрывного разрушения горных пород.

Таблица 2 – Степень ориентированности по внутреннему строению гранитов Приднепровья

Месторождение	Вид дефектов строения горной породы	Степень ориентированности $\chi_{23}^2$
Кудашевское	Интрагранулярные «залеченные» микротрещины в кварце	60
Токовское	то же	115
Мокромосковское	то же	160

Следует отметить, что такая структурная особенность кристаллических пород, как высокая степень ориентированности дефектов внутреннего строения, играющая негативную роль при разрушении динамическими нагрузками (мельчайшая силикозоопасная пыль), положительно влияет на процесс отделения монолитов декоративного и облицовочного камня от скального массива, когда используются статические или квазистатические нагрузки.

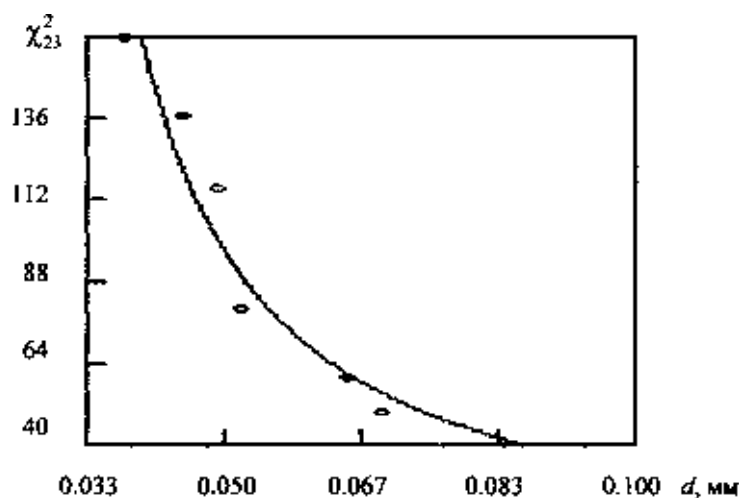


Рис.2 – Изменение среднего размера пылевидных фракций гранитов, разрушенных взрывом, в зависимости от степени их ориентированности по внутреннему строению

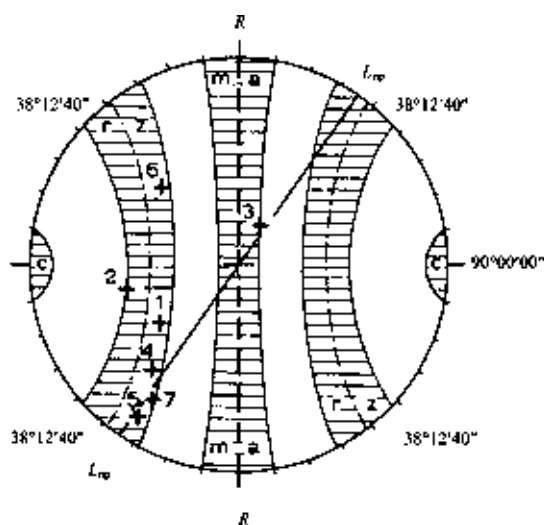
Дело в том, что требования, предъявляемые к качеству щебеночной продукции, как известно, в корне отличаются от требований к блочному камню. Поэтому с технологической (и экономической) точки зрения методы добычи блочного камня и щебня имеют мало общего. Технология отделения монолитов от массива, зависящая не только от качества исходного сырья, но и в значительной мере от структурных особенностей месторождения, базируется в основном на эффекте одновременного подрыва шпуровых зарядов дымного пороха, располагаемых строго в плоскости наилучшего раскола, именуемого в прак-

тике камнедобычи термином «рифт» (плоскость  $R$ ). Это направление, как установлено в работе [10], совпадает с простиранием субвертикально расположенных плоскостей ГЖВ в зернах кварца и, так как образование этих плоскостей является результатом регионального процесса [11], то подобные дефекты строения распространены в гранитах повсеместно и в большом количестве.

Поэтому, чем выше величина  $\chi_v^2$  – степень ориентированности таких дефектов строения, тем легче отделяются монолиты от массива при приложении нагрузки.

Установлено, что максимумы сгущений фигуративных точек выходов оптических осей кварца в гранитах на структурных диаграммах занимают строго определенное положение по отношению к плоскости наилучшего вертикального раскола  $R$  («рифту») и линейности агрегатов кварцевых зерен  $\bar{L}$ . Во всех изученных гранитах Украинского щита сгущения точек на диаграммах совпадают, как правило, с горизонтальной проекцией вектора линейности –  $L_{пр}$ .

Анализ синоптической (сводной) диаграммы, построенной относительно плоскости  $R$  (рис.3), показывает, что центры максимумов фигуративных точек выходов оптических осей кварца в изученных гранитах располагаются обычно в зонах граней ромбоэдров  $r$  и  $z$ , реже в зонах граней призм  $m$  и  $a$  и почти не встречаются в зонах граней базопинакоида  $c$  (номенклатура граней по Дж.Дэна [8]).



$R$ :+ – максимумы выходов оптических осей; цифрами на диаграмме обозначены следующие месторождения: 1 – Корнинское; 2 – Гниванское; 3 – Капустянское; 4 – Кудашевское; 5 – Токковское; 6 – Янцевское; 7 – Каранское;  $L_{пр}$  – горизонтальная проекция вектора линейности минеральных зерен; заштрихованные области – пояса базопинакоида ( $c$ ), ромбоэдров ( $r, z$ ) и призм ( $m, a$ )

Рис. 3 – Синоптическая (сводная) диаграмма ориентировки максимумов выходов оптических осей кварца гранитов УЩ, построенная относительно плоскости наилучшего вертикального раскола

Иными словами, плоскости ГЖВ или «залеченные» микротрещины в зернах кварца при своем образовании наследуют вполне определенное кристаллографическое свойство кварца, а именно – направление наибольшего ослабления структурных связей его кристаллической решетки [8,9].

Так как оптическая ось кварца пространственно взаимосвязана с плоскостью «залеченной» микротрещины, величина  $\chi_v^2$  – степень ориентированности породы по внутреннему строению – позволяет в принципе судить и о степени ориентированности микротрещин в гранитах.

Поскольку наиболее легкий вертикальный раскол («рифт») контролируется «залеченными» микротрещинами, то от их упорядоченности в пространстве зависит в общем случае процент выхода монолитных блоков при их добыче, так как существенно снижается риск «увода» магистральной трещины, образующейся при взрыве зарядов дымного пороха.

На рис.4 приведена зависимость процента выхода монолитных блоков I и II категории от степени ориентированности гранита по внутреннему строению  $\chi_{23}^2$  при 23 степенях свободы.

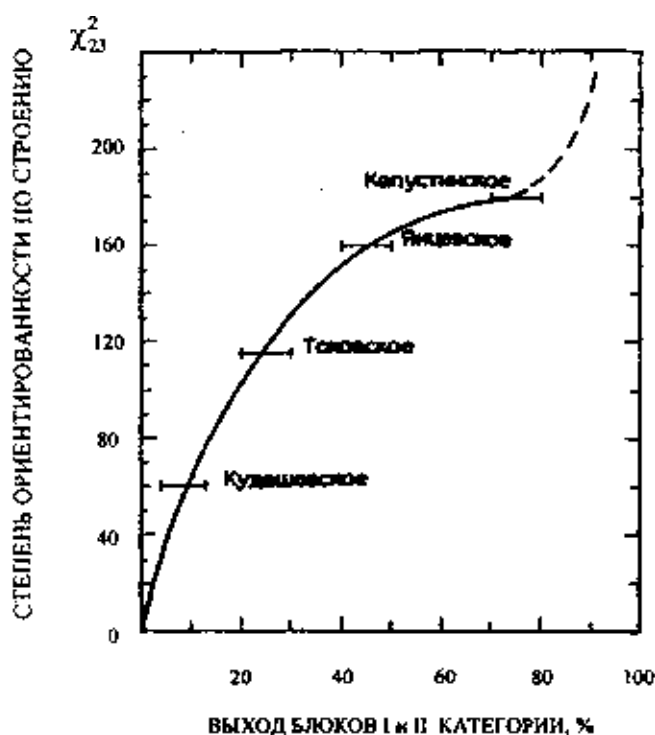


Рис.4 – Зависимость процента выхода монолитных блоков I-II категории ( $8-2,5 \text{ м}^3$ ) от величины  $\chi_{23}^2$

По данным исследований величина  $\chi_{23}^2$  изменяется в гранитах Украинского щита от 60 (Кудашевское месторождение, Днепропетровская обл.) до 180 (Капустянском месторождение, Кировоградская обл.), что является, вероятно, предельной величиной для пород данной петрографической группы. С целью сокращения больших трудозатрат, связанных со специфическими исследованиями по оценке блочности (изучение трещиноватости пород, закладка опытного карьера и исследование характера его продукции [12,13]), зависимость, приведенную на рис.4, можно использовать для прогнозной оценки объема выхода кондиционных блоков I и II категории из горной массы

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Формирование большинства горных пород в неравномерном силовом поле напряжений приводит к закономерной ориентировке в одном преимущественном направлении таких дефектов строения полиминеральной среды, как интрагранулярные микротрещины, плоскости спайности, двойниковые плоскости и плоскости трансляционного скольжения.

2. Объемная плотность мельчайших дефектов строения и степень их ориентированности прямо пропорциональна величине односторонних сжимающих усилий – стрессу.

3. При действии динамических (взрывных) нагрузок на полиминеральные среды с однонаправленными дефектами строения в виде интрагранулярных микротрещин и плоскостей газовой-жидких включений («залеченных» микротрещин) объем пылевидных фракций существенно зависит от степени ориентированности пород по внутреннему строению, что необходимо учитывать при разработке экологически безопасных способов их взрывного разрушения.

4. При отделении монолитных блоков декоративного камня от массива статическими нагрузками, т.е. взрывом заряда дымного пороха, выход товарной продукции возрастает с увеличением степени ориентированности дефектов строения пороодообразующих минералов.

5. Такие дефекты строения пород, как двойниковые плоскости и плоскости трансляционного скольжения не оказывают заметного действия на характер разрушения полиминеральной среды под действием динамических и статических нагрузок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саранчина Г.М. Федоровский метод. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1963. – 153 с.
2. Елисеев Н.А. Составление диаграмм по структурному и микроструктурному анализу. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1957. – 28 с.
3. Вистелиус А.Б. Структурные диаграммы. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958. – 175 с.
4. Braitsh, O. Quantitative Auswertung Gefugediagramme// Heidelberg Beitr. Miner. und Petrograph. – 1956. – No.5. – H.5. – S.210-226.
5. An HF-SEM technique for characterization of the weathering properties of building stones. I. granite// Scan. Electron. Microsc. – 1981. – Vol.1. – P.555-561.
6. О влиянии фракционного состава кварцсодержащих пород на содержание силикозоопасной пыли в продуктах их разрушения/ Э.И.Ефремов., В.Д.Петренко., И.Л.Кратковский, В.С.Шевченко// Докл. Акад. наук Украины, 1993. – № 5. – С.45-49.
7. Чебаненко И.И. Сравнение некоторых гранитоидов Чешского и Украинского кристаллического массивов// Проблемы геологии докембрия. – 1971. – С.73-86.
8. Дэна Дж., Дэна Э.С., Фрондель К. Система минералогии. Минералы кремнезема. – М.: Мир, 1966. – Т.3. – 430 с.
9. Справочник физических констант горных пород/ под ред. С.Кларка мл. – М.: Мир, 1969. – 543 с.
10. Кутузов Б.Н., Кратковский И.Л., Мяделец Б.Н. Закономерность распределения в гранитах кварцевых зерен и дефектов их строения// Изв.вузов. Горн.журн. – 1982. – № 1. – С.9-11.
11. Кратковский И.Л. Механизм образования вертикальных трещин в гранитных массивах// Геотехническая механика: Межвед. сб. науч.тр./ Ин-т геотех. мех. НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 27. – С. 169-174.
12. Петров В.П. Перспективы изучения неметаллических полезных ископаемых// Изв.Вузов. Геология и разведка. – 1983. – № 1. – С.63-76.
13. Беликов Б.П., Петров В.П. Облицовочный камень и его оценка. – М.: Недра, 1977. – 138 с.