

Д-р техн. наук, проф. В.П. Надутый  
(ИГТМ НАН Украины)  
канд. техн. наук, проф. А.М. Эрперт  
(НГУ)  
инж. Т.Ю. Гринюк  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ УСТУПА БАЗАЛЬТОВОГО КАРЬЕРА**

Приведені результати польових досліджень уступів базальтових кар'єрів на тріщинуватість. Установлено залежність питомої тріщинуватості від висоти уступу і її аналітичний вид.

## **DEFINITION OF FISSURING TERRACE OF BASALT-PIT**

The results of field researches terraces of basalt-pits on fissuring are given. The dependence specific fissuring from height terrace and its analytical kind is established.

Степень трещиноватости забоя карьера в значительной степени влияет на интенсивность технологических операций при добыче полезного ископаемого, на эффективность работы оборудования и получение конечного продукта требуемого качества. Трещиноватость определяет характер блочности породы, размеры блоков, их количество и форму, что важно учитывать при выборе оборудования и технологии добычи. Базальты Волыни представляют большой интерес не только как ценный строительный материал, но и как источник рудопроявлений. На северо-западном склоне Украинского кристаллического щита выделяется Волыно-Подольская плита, представленная магматическими комплексами в Волыно-Полесском прогибе. Траповая структура залегания отложений волынской серии представлена четырьмя свитами, и в соответствии с стратиграфическим разрезом сверху вниз они расположены в таком порядке: Ратненская свита базальтов со шлейфами лавокластических брекчий, горизонтами туфов, туфитов и туфоконгломератов – 50-195 м; Бабинская свита туфа с отдельными потоками базальтов – 90-235 м; Заболотовская свита базальта с прослоями туфов – 0-345 м; Горбашевский гравелито-песчаник с примесью пирокластического материала, мощностью 15-60 м.

В настоящее время ведется карьерная разработка базальтов, относящихся к Ратненской свите, покрытой меловыми (мергелитовый суглинок светло-серого цвета) и четвертичными рыхлыми отложениями, в сумме составляющими слой от 2-3 м до 5-7 м, что облегчает ведение вскрышных работ.

Полевые исследования трещинной тектоники проводились на Рафаловском карьере, добывающем базальт Ратненской свиты для изготовления высококачественного щебня, в котором обнаружен высокий процент самородной меди. Технологический процесс добычи включает проведение буровзрывных работ, погрузку и транспортировку взорванной массы на промплощадку для последующего дробления и вибрационного отсева на классы крупности. Ведение буровзрывных работ значительно увеличивает

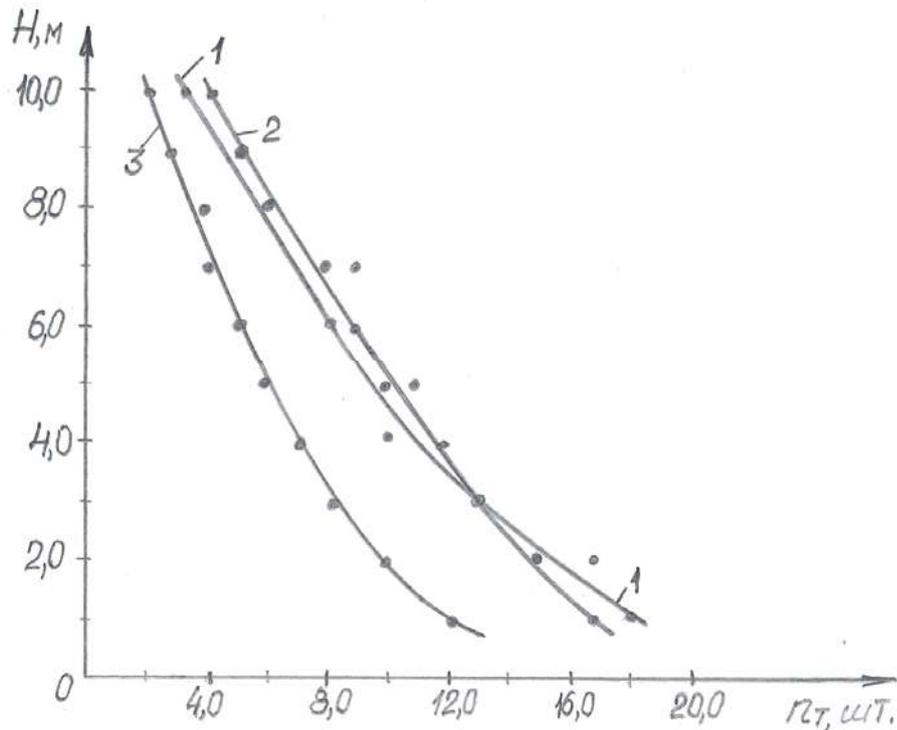
количество трещин в уступе карьера, поэтому в процессе исследований, кроме тектонических трещин, учитывались трещины техногенного происхождения, (разрывы, сбросы и трещины от взрывного воздействия). Фиксировалась поверхностная сетка в виде проекции трещин на плоскость [1-3]. Изучение особенностей блочности массива проводилось на основе массовых замеров трещиноватости, проведенных равномерно по изучаемой площади. Наиболее достоверные результаты получались по известной методике [4, 5] при изучении трещиноватости обнаженной выработки уступа площадью  $10 \times 10$  м. При этом по высоте начало отсчета производилось от подошвы уступа, поскольку его верхняя часть имеет трещины выветривания. Это ослабленная часть уступа, где трещины не образуют особых закономерностей и развиваются по уже существующим системам трещин, этим усложняют их общий план и дают дополнительно более частую сетку. Поэтому верхняя часть уступа после 10 м высоты от подошвы не исследовалась. Полученная разломно-трещинная сетка по ширине забоя в 10 м исследовалась через каждый метр, фиксируя таким образом удельную трещиноватость [5], поскольку вычислялось количество макроскопически видимых трещин, приходящихся на линейный метр обнаженной плоскости горной породы. Вертикальные линии определялись выступающими гранями столбчатых отдельностей, которые разбивают массив породы на многогранные призмы, характерные для базальтов. Столбчатость перпендикулярна лавовому потоку и является вертикальной с расстоянием между гранями до 1,0 м. Призматическая и столбчатая отдельность карьера имеет 5 или 6 граней в поперечном сечении и ширину 0,8-1,0 м. В процессе исследований, кроме удельной трещиноватости, устанавливались форма и количество (на каждом метре высоты) естественных блоков, их размер (по частоте трещин), характер изменения количества трещин и размеров блоков (отдельностей) по высоте уступа. Принятая упрощенная методика учета трещиноватости облегчает задачу исследований и не преследует цели разрешения вопросов геологии участка разработки, а позволяет установить состояние забоя в целях совершенствования или выбора технологии горного производства, параметров перерабатывающих машин, паспорта буровзрывных работ и количества взрывчатки. Например, известно [1], что с увеличением высоты уступа карьера растет период действия взрыва на среду, а это приводит к более интенсивному ее дроблению и трещиноватости. Однако в литературе при описании результатов исследований не указывается характер зависимости изменения частоты трещин в забое по высоте после взрыва, какие размеры блоков преобладают, их выход и размеры, в то время как именно эта информация в значительной мере характеризует особенности блочности массива по обнаженной поверхности уступа. Поэтому в процессе исследований определялась по известной методике [1-4] удельная трещиноватость для каждого метра высоты уступа в исследуемом квадрате забоя ( $10 \times 10$  м), а также количество (в %) максимального размера кусков (отдельностей) размерами (-300), 300...(-700) и 700...(-1000) миллиметров, в соответствии с классификацией массивов скальных пород на степени трещиноватости,

рекомендованной в работе [1]. Результаты исследований трещиноватости базальтов по трем карьерам приведены в табл. 1, из которой видно существенное изменение количества трещин по высоте уступа и образованных отдельностей.

Графический анализ полученных результатов по всем трем карьерам показал близкий характер зависимости количества трещин от высоты уступа карьера. Высокая плотность трещиноватости в верхней части уступа снижает блочность массива, и наблюдается значительное увеличение размеров блоков в нижней части уступа. Причем, в нижней части размеры блоков имеют характер негабаритов с точки зрения загрузки крупной дробилки. Указанные в таблице размеры отдельностей (блоков), принятые для анализа, связаны с размерами загрузочных отверстий конусных и щековых дробилок крупного и среднего дробления.

Зависимость удельной трещиноватости от высоты уступа определялась на трех базальтовых карьерах и представлена на рис. 1, где позиции 1, 2 и 3, соответственно, указывают на полученные экспериментальные зависимости трещиноватости по высоте карьеров: Рафаловского, Берестовецкого и в Яновой Долине. Аналогичный характер полученных зависимостей для всех трех карьеров указывает на возможную общность принятых технологических решений по добыче, дроблению, классификации и измельчению базальтов в процессе их добычи и переработки. Поскольку трещиноватость определяет размеры отдельностей в массиве, то в соответствии с принятой классификацией в процентном отношении показана на рис. 2-4, соответственно, кусковатость массива по размерам куска (отдельностей) (-300) мм, 300...(-700) мм и 700...(-1000) мм для исследуемых базальтовых забоев на всех трех карьерах [6, 7].

Графический анализ результатов исследований дает представление о плотности распределения отдельностей разной величины по высоте уступа и позволяет выполнить прогноз кусковатости дробленой руды до взрыва, принять ориентировочные расстояния между скважинами для взрывчатки, позволяющие исключить взаимное переизмельчение базальта в результате действия взрывной волны. Однако возникает необходимость предварительной количественной оценки кусковатости.



1 – Рафаловский карьер; 2 – Берестовецкий карьер; 3 – карьер с. Янова Долина

Рис. 1 – Зависимость удельной трещиноватости от высоты уступа карьера

Для более точного определения кусковатости потребовалась разработка методики расчета аналитической зависимости по имеющимся экспериментальным данным. При этом в первую очередь изучается зависимость показателей удельной трещиноватости уступов базальтовых карьеров и выхода размеров максимального куска от высоты уступа.

Обозначим:  $x$  – высота уступа;  
 $y$  – изучаемый показатель.

Результаты исследований представлены значениями:

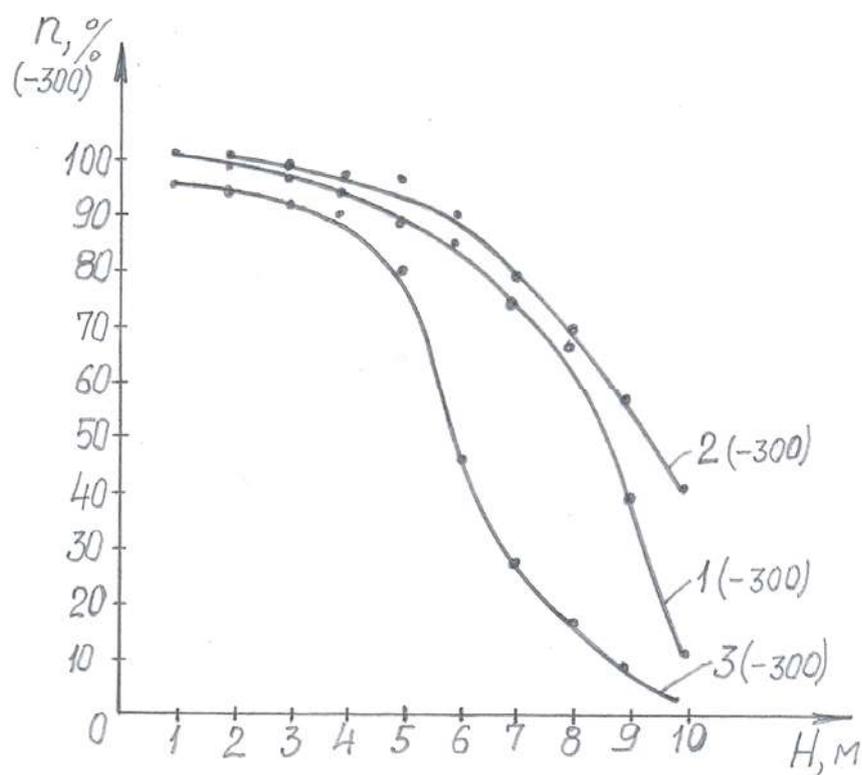
$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}.$$

Задача состоит в определении зависимости

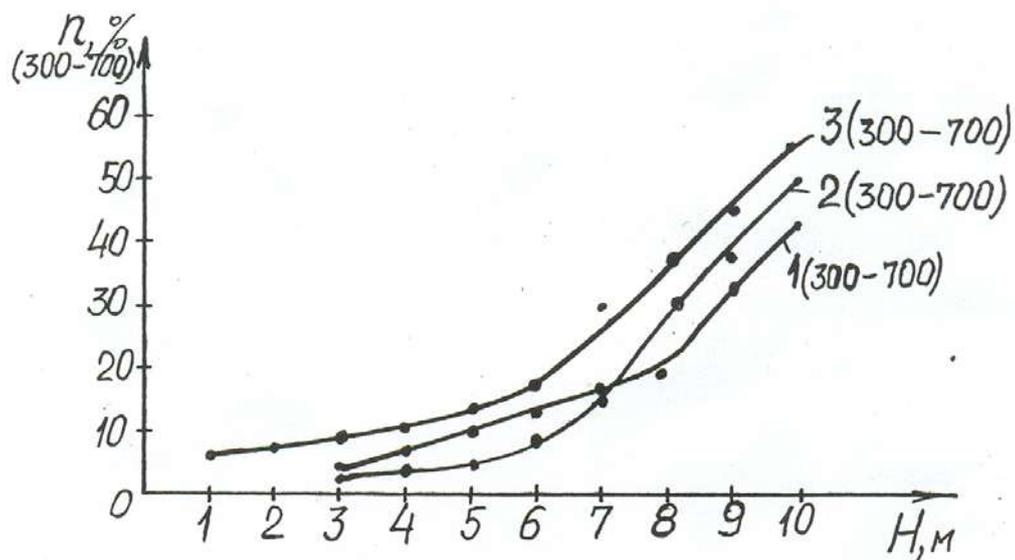
$$\hat{y} = f(A, x),$$

где  $A = \{a_0, a_1, \dots, a_m\}$  – параметры функции.



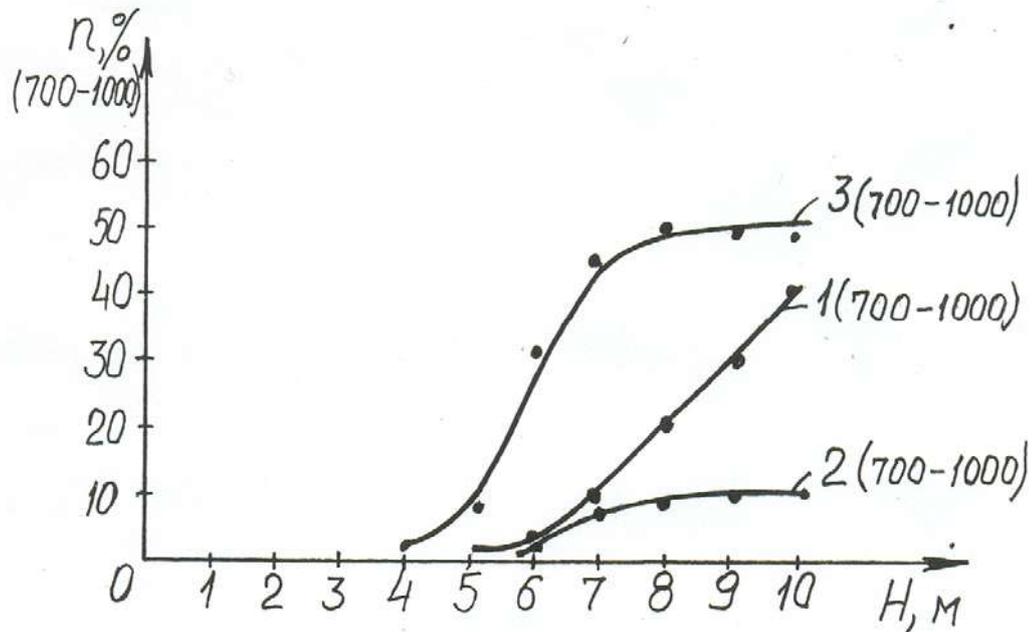
1 – Рафаловский карьер; 2 – Берестовецкий карьер; 3 – карьер с. Янова Долина

Рис. 2 – Зависимость количества (в %) отдельностей размером (-300) мм от высоты уступа карьера



1 – Рафаловский карьер; 2 – Берестовецкий карьер; 3 – карьер с. Янова Долина

Рис. 3 – Зависимость количества (в %) отдельностей размером (300–700) мм от высоты уступа карьера



1 – Рафаловский карьер; 2 – Берестовецкий карьер; 3 – карьер с. Янова Долина  
 Рис. 2 – Зависимость количества (в %) отдельностей размером (700–1000) мм от высоты уступа карьера

Для получения функции  $f$  применим метод наименьших квадратов. Критерий метода

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - f(A, x_i))^2 \rightarrow \min.$$

Для минимизации критерия  $F$  приравниваем к нулю его производные по искомым параметрам

$$\frac{\partial F}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial a_1} = 0, \dots, \quad \frac{\partial F}{\partial a_m} = 0.$$

Полученную систему уравнений решаем относительно искомым параметров функции. Поскольку при подборе функции могут быть использованы различные зависимости – полиномиальные и нелинейные, то для выбора наилучшего приближения для каждой зависимости вычисляют коэффициент детерминации  $R^2$ . Принимается та зависимость, для которой коэффициент детерминации наибольший.

Для полиномиальной зависимости систему уравнений получаем непосредственно по исходным переменным. Так, например, для

параболической зависимости  $\hat{y} = f(A, x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$  система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \frac{\sum x_i}{n} + a_2 \frac{\sum x_i^2}{n} = \frac{\sum y_i}{n}, \\ a_0 \frac{\sum x_i}{n} + a_1 \frac{\sum x_i^2}{n} + a_2 \frac{\sum x_i^3}{n} = \frac{\sum y_i x_i}{n}, \\ a_0 \frac{\sum x_i^2}{n} + a_1 \frac{\sum x_i^3}{n} + a_2 \frac{\sum x_i^4}{n} = \frac{\sum y_i x_i^2}{n}. \end{cases}$$

Параметры функции  $a_0, a_1, a_2$  находим из решения этой системы уравнений.

Если искомая функция задается не полиномом  $m$ -й степени, а нелинейным выражением иного вида, то перед применением метода наименьших квадратов ее надо преобразовать к линейному виду путем замены переменных. Пусть, например,  $\hat{y} = f(A, x) = a_0 \cdot ax^{a_1}$  – степенная функция.

Выполним логарифмирование

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x.$$

Обозначим  $Y = \ln y, A_0 = \ln a_0, X = \ln x$ .

Получаем линейную модель

$$Y = A_0 + a_1 X.$$

Для расчета ее параметров  $A_0$  и  $a_1$  методом наименьших квадратов получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} A_0 + a_1 \frac{\sum X_i}{n} = \frac{\sum Y_i}{n}, \\ A_0 \frac{\sum X_i}{n} + a_1 \frac{\sum X_i^2}{n} = \frac{\sum Y_i X_i}{n}. \end{cases}$$

Искомые коэффициенты зависимости  $A_0$  и  $a_1$  получаем из решения этой системы уравнений. Окончательно имеем  $a_0 = \exp(A_0)$ .

Для вычисления коэффициента детерминации  $R^2$  определяем два показателя вариации:

- общую вариацию  $\Delta = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ,

- вариацию тренда  $\delta = \sum_{i=1}^n (\bar{y} - f(A, x_i))^2$ .

Коэффициент детерминации

$$R^2 = \frac{\delta}{\Delta}.$$

Варианты выбора наиболее адекватной аппроксимирующей функции представлены в табл. 2, где показаны результаты опробования различных зависимостей. По коэффициенту детерминации определяем, что наилучшее приближение дает парабола 3-го порядка.

Таблица 2 – Выбор зависимости удельной трещиноватости от высоты уступа

Виды функций	Название карьера
	<b>Рафаловский карьер</b>
Линейная	$y = 18,533 - 1,588x; R^2 = 0,9472$
Параболическая	$y = 20,617 - 2,6295x + 0,0947x^2; R^2 = 0,9688$
Парабол. 3-го порядка	$y = 22,8 - 4,566x + 0,5146x^2 - 0,0254x^3; R^2 = 0,9779$
Логарифмическая	$y = 19,71 - 6,561 \ln x; R^2 = 0,948$
Степенная	$y = 24,265x^{-0,6844}; R^2 = 0,8181$
Экспоненциальная	$y = 23,033e^{-0,1785x}; R^2 = 0,9491$
	<b>Берестовецкий карьер</b>
Линейная	$y = 17,867 - 1,4121x; R^2 = 0,9857$
Параболическая	$y = 18,2 - 1,5788x + 0,0152x^2; R^2 = 0,9864$
Парабол. 3-го порядка	$y = 18,933 - 2,2292x + 0,1562x^2 - 0,0085x^3; R^2 = 0,9878$
Логарифмическая	$y = 18,603 - 5,6295 \ln x; R^2 = 0,9183$
Степенная	$y = 22,166x^{-0,5836}; R^2 = 0,7191$
Экспоненциальная	$y = 21,581e^{-0,1554x}; R^2 = 0,9546$
	<b>Карьер с. Янова Долина</b>
Линейная	$y = 11,733 - 1,0242x; R^2 = 0,9521$
Параболическая	$y = 13,483 - 1,8992x + 0,0795x^2; R^2 = 0,9889$
Парабол. 3-го порядка	$y = 14,767 - 3,0375x + 0,3263x^2 - 0,015x^3; R^2 = 0,9965$
Логарифмическая	$y = 12,596 - 4,3009 \ln x; R^2 = 0,9841$
Степенная	$y = 15,517x^{-0,7045}; R^2 = 0,8673$
Экспоненциальная	$y = 14,496e^{-0,1811x}; R^2 = 0,9776$

Результаты расчетов удельной трещиноватости и выхода размеров кусков (отдельностей) приведены в табл. 3.

Расчет выхода (в процентном отношении) базальтов по крупности всех трех контролируемых классов рассчитывается по полученным зависимостям для исследуемых карьеров в каждом метре высоты уступа.

Таблица 3 – Результаты расчета выхода по крупности

Размер отдельности, мм	Название карьера
1	2
	<b>Рафаловский карьер</b>
до 300	$y = 105,7 - 5,978x + 1,5064x^2 - 0,1822x^3; R^2 = 0,9945$
300-700	$y = 2,8667 - 2,0758x + 0,5909x^2; R^2 = 0,9532$
700-1000	$y = 1,9333 - 1,2591x - 0,0781x^2 + 0,0598x^3; R^2 = 0,9924$
	<b>Берестовецкий карьер</b>
до 300	$y = 95,4 + 4,6667x - 1,0303x^2; R^2 = 0,9885$
300-700	$y = 2,0333 - 1,6692x + 0,25x^2 + 0,0404x^3; R^2 = 0,9868$
700-1000	$y = -0,9 + 0,0773x + 0,1136x^2; R^2 = 0,9117$
	<b>Карьер с. Янова Долина</b>
до 300	$y = 82,667 + 12,538x - 1,8902x^2 - 0,4194x^3 + 0,0405x^4; R^2$
300-700	$y = 7,3833 - 2,9492x + 0,7386x^2; R^2 = 0,9866$
700-1000	$y = 7,5933 - 6,6803x - 0,0663x^2 + 0,5541x^3 - 0,0447x^4; R^2$

Таким образом, в результате выполненных исследований показано, что трещиноватость уступа базальтовых карьеров имеет неравномерное распределение по его высоте. В результате полученные отдельности горного массива распределяются от меньших к большим сверху вниз по параболическому закону (3-го порядка). Установленная закономерность позволяет определять процентное содержание отдельностей трех типоразмеров для каждого метра высоты уступа. Прогноз таких параметров позволяет рационально планировать буровзрывные работы и выбирать параметры технологического оборудования по дальнейшей переработке базальта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по буровзрывным работам на карьерах / М.Ф. Друкованый, Л.В. Дубнов, Б.Н. Кутузов, Э.И. Ефремов. – Киев: Наук. думка, 1973. – 435 с.
2. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
3. Михайлов А.Е. Полевые методы изучения трещин в горных породах. – М.: Госгеолтехиздат, 1956. – 320 с.
4. Павлова Н.Н. Трещиноватость и разрушение горных пород. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
5. Беликов Б.П., Петров В.П. Облицовочный камень и его оценка. – М.: Недра, 1977. – 138 с.
6. Справочник по тектонической терминологии / Под ред. Ю.А. Косыгина и Л.М. Парфенова. – М.: Недра, 1970. – 584 с.
7. Ажгирей Г.Д. Структурная геология. – М.: изд-во МГУ, 1966. – 343 с.