

УДК 622.271.622.831

## ТРЕЩИНОВАТОСТЬ ПОРОДНОГО МАССИВА В КАРЬЕРЕ РУДНИКА «ЖЕЛЕЗНЫЙ» АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»

**И. М. ИГНАТЕНКО<sup>1</sup>**

директор Института наук о Земле,  
канд. техн. наук,  
ignatenko\_i@bsu.edu.ru

**Е. Б. ЯНИЦКИЙ<sup>2</sup>**

зам. генерального директора  
по научной работе и развитию,  
канд. геогр. наук

**В. А. ДУНАЕВ<sup>2</sup>**

проф., д-р. геол.-минерал. наук

**С. Г. КАБЕЛКО<sup>2</sup>**

ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

<sup>2</sup> ОАО «ВНИОГЕМ», Белгород, Россия

### Введение

Ковдорское апатит-магнетитовое месторождение расположено в Мурманской области вблизи границы с Финляндией. Оно представлено крупным столбообразным рудным телом, уходящим на глубину более 1,5 км, и залегает в юго-западной краевой части прорывающего архейские гнейсы девонского интрузивного массива центрального типа, сложенного ультраосновными (оливинитами, пироксенитами) породами, образующими ядро массива, и окружающими его щелочными породами, преимущественно ийолитами. Ийолитовый магматизм сопровождался широким развитием по гнейсам щелочных метасоматитов (фенитов). Рудное тело в плане на поверхности породного массива вытянуто субмеридионально на 1,3 км с увеличением широты с севера на юг от 200 до 800 м. Южная расширенная его часть имеет форму эллипса, удлинённого в северо-восточном направлении по азимуту 45°. С глубиной рудное тело постепенно сужается с сохранением качества руды.

Последовательность формирования руд двухэтапная. Вначале образовались апатит-форстерит-магнетитовые руды как следствие кристаллизации внедрившегося с глубины рудного расплава, а в их окружении по вмещающим породам возникли маложелезистые апатит-флогопит-форстеритовые руды метасоматического генезиса. Второй этап – внедрение карбонатитовой магмы, залечивание ею всех имеющихся на это время трещин породного массива, образование карбонатитов (кальцитовых, реже – доломитовых),

В процессе открытой разработки месторождений полезных ископаемых важнейшим фактором, влияющим на устойчивость уступов карьера и взрываемость скальных пород, в том числе руд, является трещиноватость вскрытого породного массива. В статье на примере карьера рудника «Железный» показана динамика развития трещиноватости в плане и по глубине породного массива и обоснована целесообразность ежегодной оценки трещиноватости на отработываемых уступах.

**Ключевые слова:** разрывные нарушения, блокообразующая трещиноватость, блочность и крепость горных пород, аппроксимирующая функция, изменение среднего размера отдельности пород с глубиной.

**DOI:** 10.17580/gzh.2019.10.01

а также апатит-карбонатно-магнетитовых руд, формирующих внутри южной расширенной части рудной залежи субвертикальное тело овального сечения, вытянутого на северо-восток. В целом на месторождении карбонатиты распространены как непосредственно в рудном теле, так и во вмещающих его горных породах в виде дайкоподобных тел неправильной формы мощностью до 50–80 м, типичных даек мощностью от дециметров до 10 м, прожилков. Посткарбонатитовый этап характерен возникновением разрывных нарушений и трещин без их гипогенного минерального заполнителя. При проведении горных работ эти разрывы и трещины определяют степень сопротивляемости пород взрывному разрушению и устойчивость уступов карьера.

От земной поверхности до глубины 20 м коренные породы представлены продуктами их химического выветривания в виде глинисто-песчано-древяной массы с реликтами слабовыветрелых исходных пород, а ниже до глубины около 50 м – дезинтегрированными породами, связь между элементарными блоками которых ослаблена за счет раскрытости и выщелачивания их первичного заполнителя с образованием гидрослюдистого и глинистого материала, пропитанного гидроксидами железа.

Эксплуатация Ковдорского месторождения началась открытым способом в 1962 г., а с 1975 г. по настоящее время специалистами ОАО «ВНИОГЕМ» проводится в рамках геологоструктурного картирования уступов карьера натурное изучение блочности породного массива. В последние 5 лет картирование уступов осуществляется фотометрическим методом с использованием телеобъективов и беспилотных летательных аппаратов, а с 2016 г. – путем лазерного сканирования уступов [1]. Размер современного карьера в плане по поверхности составляет 2,3×2 км, достигнутая его глубина – 594 м, ежегодная добыча руды – 19 млн т.

### Методика и результаты исследования

По результатам полевых работ изучена иерархия разрывов в породном массиве, установлены средние значения размера

отдельности пород различных петрографических типов, а также распространенность пород каждого типа с оценкой их блочности [2].

Иерархия разрывов в породном массиве характеризуется следующим.

1. Разрывные нарушения протяженностью 300–500 м, мощностью 0,2–1 м, редко более (до 4–6 м), представлены сильно-трещиноватыми и дроблеными породами, ограниченными притертыми плоскостями с глиной трения. Расстояние между соседними нарушениями одной системы составляет 30–100 м, в среднем – 50 м. По разрывным нарушениям многократно проявлялись тектонические подвижки, обусловившие наличие борозд скольжения нескольких направлений на стенках трещин одной ориентировки.

2. Крупные трещины шириной до 1–2 см прослеживаются на всю высоту заоткошенного уступа. Их протяженность может достигать 50 м. Расстояние между смежными трещинами составляет 4–15 м, в среднем – 7 м.

3. Блокообразующая (фоновая) трещиноватость создает отдельности в породном массиве и обусловлена мелкими трещинами протяженностью 3–20 м. Размер отдельности, ограниченный такими трещинами, варьирует от дециметров до первых метров. Трещиноватость вскрытого карьером породного массива представлена четырьмя-шестью системами трещин, из которых, как правило, наиболее проявлены три системы, определяющие форму элементарного структурного блока в виде параллелепипеда, образованного почти взаимно ортогональными крутопадающими и субгоризонтальной или пологой системами трещин. В карбонатитовых дайках одна крутопадающая система трещин следует параллельно, а другая перпендикулярно контактам даек. Вместе с тем на некоторых участках месторождения в равной мере развиты трещины всех систем, что создает сложную геометрию решетки трещиноватости и форм породных отдельностей.

Средний размер отдельности различных петрографических типов пород в порядке его увеличения составляет, м: кальцит-форстерит-магнетитовые руды (КФМ) – 0,56; апатит-карбонатные руды (АК) – 0,64; фениты – 0,71; кальцитовые карбонатиты – 0,73; форстерит-магнетитовые руды (ФМ) – 0,84; доломитовые карбонатиты – 0,85; ийолиты – 0,87; апатит-кальцит-магнетитовые руды (АКМ) – 0,88; апатит-силикатные руды (АС) – 0,89; апатит-форстерит-магнетитовые (АФМ) – 0,92; пироксениты – 0,98.

Распространенность в карьере различных петрографических типов пород (в процентах занимаемый ими площади) в порядке ее уменьшения представлена следующим рядом: пироксениты – 28,44; ийолиты – 26,59; фениты – 18,33; АФМ-руды – 9,52; кальцитовые карбонатиты – 6,69; АС-руды – 3,87; АКМ-руды – 3,15; доломитовые карбонатиты – 1,14; АК-руды – 0,98; ФМ-руды – 0,94; КФМ-руды – 0,35.

Согласно принятой классификации горных пород по степени их блокообразующей трещиноватости [3] в массиве Ковдорского месторождения, вскрытом карьером, установлено преобладание (47 %) крупноблочных пород 0,5–1 м (III категория), представленных преимущественно ийолитами, пироксенитами и АФМ-рудами. Далее идут среднеблочные (0,1–0,5 м) породы

II категории (29 %). Среди них преобладают ийолиты, фениты и прироксениты. Весьма крупноблочные (1–1,5 м) породы IV категории (19 %) и исключительно крупноблочные (>1,5 м) породы V категории (5 %) представлены главным образом пироксенитами, ийолитами и АФМ-рудами. Породы I категории с размером отдельности до 0,1 м не учитывали, поскольку они развиты спорадически, и их мощность не превышает 2 м.

Распределение отдельностей различного размера в породном массиве Ковдорского месторождения подчиняется логнормальному закону. Статистические характеристики этого распределения приведены ниже, а полигон вариационного ряда и график плотности вероятности размера отдельности показан на рис. 1.

Статистические характеристики размера отдельности пород Ковдорского месторождения

Размах $R$ , м	5,46
Среднее значение $x$ , м	0,83
Математическое ожидание $m_x$ , м	0,81
Мода $\mu$ , м	0,58
Среднеквадратичное отклонение $\sigma$	0,53
Коэффициент вариации $v$	63,64
Коэффициент асимметрии $A$	1,69
Экссесс $E$	3,99
Число измерений $N$	248120

Результаты физико-механических испытаний образцов пород и руд Ковдорского месторождения позволили установить, что в карьере рудника «Железный» все петрографические типы пород глубже зоны гипергенной дезинтеграции обладают высокой крепостью  $f$  по шкале М. М. Протоdjяконова. При этом выделяются три группы пород по категориям крепости: крепкие (III) – карбонатиты, пироксениты, руды АКМ, АС, АФМ, АК ( $\sigma_{сж} = 70 \div 100$  МПа,  $f = 7 \div 10$ ); очень крепкие (II) – руды КФМ, ФМ ( $\sigma_{сж} = 100 \div 140$  МПа,  $f = 10 \div 14$ ) и в высшей степени крепкие (I) – фениты, ийолиты ( $\sigma_{сж} > 140$  МПа,  $f > 14$ ).

Сопоставление различных петрографических типов пород по среднему размеру блока (отдельности) и прочности (крепости) показало отсутствие зависимости между указанными параметрами (табл. 1). Нумерация этих типов по направлению увеличения их среднего размера блока никак не коррелируется с таковой по среднему значению их прочности.

Сказанное соответствует тому, что нередко в литологически однородных участках породного массива в пределах одного

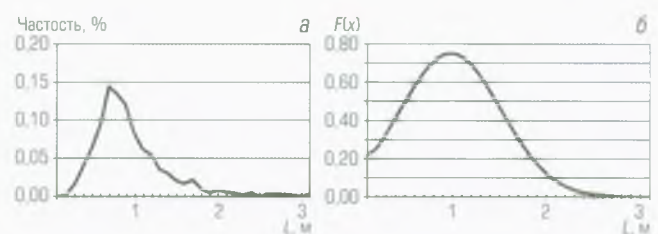


Рис. 1. Полигон вариационного ряда (а) и график плотности вероятности (б) размера отдельности  $L$  в породном массиве Ковдорского месторождения

**Таблица 1. Средние значения размера отдельности (м) и прочности ( $\sigma_{сж}$ , МПа) пород и руд Ковдорского месторождения**

Петрографический тип	Средние значения параметров	
	Размер отдельности, м	$\sigma_{сж}$ , МПа
КФМ-руды	0,56 (1)	100,11 (8)
АК-руды	0,64 (2)	78,71 (3)
Фениты	0,71 (3)	146,57 (10)
Кальцитовые карбонатиты	0,73 (4)	70,94 (1)
ФМ-руды	0,84 (5)	138,96 (9)
Доломитовые карбонатиты	0,85 (6)	86,25 (4)
Ийолиты	0,87 (7)	213,2 (11)
АКМ-руды	0,88 (8)	88,54 (5)
АС-руды	0,89 (9)	78,46 (2)
АФМ-руды	0,92 (10)	92,09 (6)
Пироксениты	0,98 (11)	98,12 (7)

Примечание. Цифры в скобках – номера петрографических типов пород и руд по мере увеличения среднего значения размера отдельности.

интервала глубины среди сравнительно мелкоблочных пород залегают их крупноблочные аналоги [4]. Это свидетельствует о пространственной изменчивости интенсивности тектонического поля напряжений в процессе формирования посткарбонатитовой разрывной структуры месторождения и слабо проявленной зависимости блочности пород от их петрографического типа (см. табл. 1), что определяет целесообразность ежегодной оценки трещиноватости пород на откосах обрабатываемых уступов карьера [5].

Вместе с тем в пределах одного петрографического типа четко прослеживается тенденция к увеличению их прочности (крепости) в направлении от II к V категории блочности, но при этом иногда породы соседних категорий блочности характеризуются близкими значениями прочности (табл. 2). Средняя разница между прочностью пород ( $\sigma_{сж}$ , МПа) II и III категории – 21,1; III и IV – 19,38; IV и V – 27,76.

Установленная тенденция к снижению прочности пород в направлении уменьшения их блочности, особенно ярко выраженная в мелкоблочных породах (II категория), обусловлена неоднородностью поля тектонических напряжений в породном массиве [6]. На его участках, подвергнутых наиболее сильному воздействию этих напряжений, образовались мелкоблочные породы, в которых происходило нарушение их структуры (ослабление связи между минералами, появление микротрещин), что и обусловило существенное снижение прочности пород.

Для Ковдорского месторождения установлена экспоненциальная зависимость коэффициента фильтрации (водопроницаемости пород) от глубины с асимптотическим приближением его значения к нулю на глубине 350–400 м [7]. Поскольку коэффициент фильтрации генетически связан с трещиноватостью породного массива, то экспоненциальная зависимость среднего размера отдельности пород  $L_{cp}$  от глубины  $h$  определялась аппроксимирующей эту зависимость функцией:  $L_{cp}(h) = a_1 - a_2 e^{-a_3 h}$ , где  $e$  – число Эйлера (~2,718), а значения коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  определяют методом наименьших квадратов с применением дифференцирования. В итоге была получена система нелинейных уравнений:

**Таблица 2. Прочность ( $\sigma_{сж}$ , МПа) пород различной категории блочности, относящихся к одному петрографическому типу**

Минерально-петрографические типы пород и руд	N	Категории блочности			
		II	III	IV	V
Ийолиты	68	171,53 (28)	219,98 (13)	259,49 (13)	201,80 (14)
Пироксениты	51	43,05 (11)	82,35 (19)	100,5(10)	166,58 (11)
Фениты	27	105,33 (8)	124,85 (6)	Н. д.	209,52 (13)
Доломитовые карбонатиты	45	81,24 (26)	82,97 (11)	94,56(8)	Н. д.
Кальцитовые карбонатиты	20	72,88 (11)	69,01 (9)	Н. д.	Н. д.
АКМ-руды	19	57,22 (5)	98,04 (6)	110,36(8)	Н. д.
КФМ-руды	56	81,55 (3)	91,95 (17)	111(4)	115,95 (32)
АФМ-руды	45	91,50 (12)	77,49 (5)	90,66(13)	108,70 (15)
ФМ-руды	16	Н. д.	88,51 (6)	Н. д.	138,96 (10)
АК-руды	15	35,34 (1)	62,71 (1)	88,20(7)	128,61 (6)
АС-руды	43	68,24 (12)	73,78 (8)	89,51(13)	82,32 (10)
<b>Всего значений прочности пород</b>	<b>405</b>	<b>117</b>	<b>101</b>	<b>76</b>	<b>111</b>

Примечание. Количество определений прочности пород: N – по петрографическим типам, в скобках – по категориям блочности; Н. д. – нет данных.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (a_1 - a_2 e^{-a_3 h_i} - \bar{d}_i) = 0; \\ \sum_{i=1}^n [(a_1 - a_2 e^{-a_3 h_i} - \bar{d}_i) e^{-a_3 h_i}] = 0; \\ \sum_{i=1}^n [(a_1 - a_2 e^{-a_3 h_i} - \bar{d}_i) h_i e^{-a_3 h_i}] = 0, \end{cases}$$

где  $n$  – число фактических данных,  $\bar{d}_i$  – значение среднего размера отдельности пород.

Представленная система уравнений решена итерационными методами [8, 9] способом Стеффенсена [10] с использованием исходных данных, приведенных ниже.

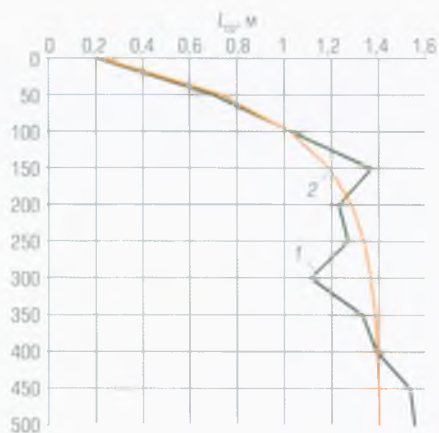
*Изменение среднего размера отдельности горных пород с глубиной*

$h, м$	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$d, м$	0,2	0,7	1,03	1,37	1,23	1,27	1,11	1,33	1,39	1,53	1,55
$L_{cp}(h), м$	0,22	0,73	1,02	1,19	1,28	1,33	1,36	1,38	1,39	1,40	1,40

Полученные в результате этого решения значения упомянутых выше коэффициентов следующие:  $a_1 = 1,4$ ,  $a_2 = 1,19$ ,  $a_3 = 0,011$ , а функции  $L_{cp}(h) = 1,4 - 1,19 e^{-0,011 h}$ .

На ее основе построен график изменения среднего размера отдельности пород с глубиной (рис. 2)

На графике по координате  $h$  за нуль взята отметка кровли скальных пород (+270 м), а фактическое значение среднего размера отдельности определено по каждому 50-метровому интервалу в диапазоне от +270 до –230 м, т. е. не менее 500 м по вертикали. Корреляционное отношение между фактическими данными и аппроксимирующей кривой – 0,95. Согласно этой кривой, средний размер отдельности пород увеличивается с глубиной резко (от 0,22 до 1,19 м) в интервале 0–150 м, затем постепенно (от 1,19 до 1,4 м) до глубины 450 м, а глубже стабилизируется на



**Рис. 2.** График изменения среднего размера отдельности горных пород с глубиной (1) и аппроксимирующая его кривая (2)

уровне 1,4 м, что близко соответствует глубине (400 м) асимптотического приближения к нулю коэффициента фильтрации.

Следует отметить, что от среднего размера отдельности массива, величины раскрытия естественных трещин, числа систем трещин и их расположения зависит показатель трещиноватости горного массива [11], который существенно влияет на все параметры буровзрывных работ [12] и сейсмическое действие массовых взрывов на окружающие объекты [13]. Помимо этого, показатель трещиноватости определяет модуль упругости

трещиноватого горного массива, а следовательно, — его устойчивость [11, 14].

### Выводы

1. Существующая посткарбонатитовая разрывная структура породного массива Ковдорского месторождения, включая и создающую отдельности пород блокообразующую трещиноватость, сформировалась как результат многократных, не сопровождающихся магматизмом и гидротермальными процессами, тектонических подвижек.

2. Зачастую на участках пород одного петрографического типа на одной глубине в мелкоблочных породах залегают их крупноблочные аналоги как следствие пространственной изменчивости интенсивности тектонических напряжений в породном массиве. Этот фактор приводит к слабой зависимости блочности пород от их петрографического типа и необходимости ежегодной оценки трещиноватости пород на откосах обрабатываемых уступов карьера.

3. В направлении от II к V категории блочности пород четко прослеживается тенденция к увеличению их крепости. Существенное снижение крепости пород II категории блочности обусловлено ослаблением связи между минералами и появлением микротрещин под влиянием тектонических напряжений в породном массиве.

4. Средний размер отдельности скальных горных пород вниз по вертикали от их верхней границы увеличивается от 0,22 до 1,4 м и стабилизируется на глубине 450 м.

### Библиографический список

1. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Konovalov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS GEOMIX // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No. 4. P. 26809–26818.
2. Дунаев В. А., Игнатенко И. М. Методика геолого-структурного обеспечения открытой разработки месторождений железистых кварцитов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Естественные науки. 2011. Вып. 16. № 15(110). С. 121–131.
3. Временная классификация горных пород по степени трещиноватости в массиве : информ. вып. В-199. — М. : ИГД, 1968. — 30 с.
4. Латышев О. Г. Неоднородность трещинной структуры и прочность горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 152–159.
5. Рождественский В. Н., Панжин А. А., Пьянзин С. Р., Кочнев К. А. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 5. С. 75–79.
6. Латышев О. Г., Прищепина Д. В. Прогноз деформационных характеристик трещиноватого породного массива // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 1. С. 80–85.
7. Пономаренко Ю. В. Генетическая связь трещиноватости и закономерного изменения водопроницаемости скальных пород по глубине // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях : сб. матер. 8-го Междунар. симпозиума. — Белгород, 2005. Ч. 1. С. 123–138.
8. Rostami M., Lotfi T., Brahmnd A. A Fast Derivative-Free Iteration Scheme for Nonlinear Systems and Integral Equations // Mathematics. 2019. Vol. 7. Iss. 7. 637. DOI: 10.3390/math7070637
9. Amiri A., Darvishi M. T., Cordero A., Torregrosa J. R. An Efficient Iterative Method Based on Two-Stage Splitting Methods to Solve Weakly Nonlinear System // Mathematics. 2019. Vol. 7. Iss. 9. 815. DOI: 10.3390/math7070815
10. Cordero A., Jordan C., Sanabria E., Torregrosa J. R. A New Class of Iterative Processes for Solving Nonlinear Systems by Using One Divided Differences Operator // Mathematics. 2019. Vol. 7. Iss. 9. 776. DOI: 10.3390/math7070776
11. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. — Белгород, 2017. — 191 с.
12. Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н. Метод расчета параметров буровзрывных работ на карьерах с целью обеспечения заданного качества дробления горных пород // Горный журнал. 2017. № 8. С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.12
13. Тюпин В. Н. Определение безопасных расстояний при проведении массовых взрывов вблизи выработанного пространства в трещиноватых горных массивах // Взрывное дело. 2019. № 122/79. С. 180–194.
14. Тюпин В. Н. Установление динамически устойчивых размеров обнажений трещиноватого напряженного горного массива при камерных вариантах систем разработки // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22. № 6. С. 31–39. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 10, pp. 11–15  
DOI: 10.17580/gzh.2019.10.01

V. A. Dunaev<sup>2</sup>, Professor, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences  
S. G. Kabelko<sup>2</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

<sup>1</sup>Belgorod National University, Belgorod, Russia

<sup>2</sup>VIOGEM, Belgorod, Russia

### Jointing of rock mass in open pit at the Zhelezny mine of the Kovdor Mining and Processing Plant

#### Information about authors

I. M. Ignatenko<sup>1</sup>, Director of the Institute of Earths Sciences, Candidate of Engineering Sciences, ignatenko\_i@bsu.edu.ru

E. B. Yanitsky<sup>2</sup>, Deputy CEO in Research and Development, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences

#### Abstract

In open pit mining, the critical factor of pitwall stability and blastability is jointing of exposed rock mass. This article, in terms of the open pit at the Zhelezny mine of Kovdor Mining and Processing Plant, shows variability in jointing intensity laterally and vertically in rock mass under development. Moreover, it is found that lithologically uniform sites are composed of both low and heavily jointed rocks at the same

depth, due to the spatial variability of tectonic stress field intensity. This implies weak dependence of jointing on petrographic type of rocks and, accordingly, advisability of annual estimation of jointing in pitwall rock mass. It is found that heavy jointing reduces strength of rocks, which is especially observable in jointing category II rock mass, as a result of weaker cohesion between mineral particles and due to formation of microcracks under the action of tectonic stresses.

Considering exponential dependence of average block size on depth and the approximating function of this dependence, the graph of behavior of average block size with depth is plotted in the size range from 0.22 to 1.19 m in the depth interval of 0–150 m and to 1.4 m at the depth of 450 m.

**Keywords:** faulting, jointing, block sizes and strength of rocks, approximating function, variation in average block size with depth.

**References**

1. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Konovalov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS GEOMIX. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, No. 4. pp. 26809–26818.
2. Dunaev V. A., Ignatenko I. M. Technique of geologo-structural maintenance of open-pits of developing deposits of ferrous quartzites. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennyye nauki*. 2011. Vol. 16, No. 15(110). pp. 121–131.
3. Temporary classification of rocks by the fissuring degree in massif : informational issue B-199. Moscow : IGD, 1968. 30 p.
4. Latyshev O. G. Inhomogeneity of crack structure and strength of rocks. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2014. No. 6. pp. 152–159.
5. Rozhdestvenskiy V. N., Panzhin A. A., Pyanzin S. R., Kochnev K. A. Study of fracturing of local masses by using the ground laser scanning. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2014. No. 5. pp. 75–79.

6. Latyshev O. G., Prishchepa D. V. The forecast of deformational characteristics of jointed rock massif. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2017. No. 1. pp. 80–85.
7. Ponomarenko Yu. V. Genetic linkage of jointing and regular change in water permeability in hard rocks with depth. *Mineral Mining and Underground Construction in Complicated Hydrogeological Conditions : The 8th International Symposium Proceedings*. Belgorod, 2005. Iss. 1. pp. 123–138.
8. Rostami M., Lotfi T., Brahmnd A. A Fast Derivative-Free Iteration Scheme for Nonlinear Systems and Integral Equations. *Mathematics*. 2019. Vol. 7, Iss. 7. 637. DOI: 10.3390/math7070637
9. Amiri A., Darvishi M. T., Cordero A., Torregrosa J. R. An Efficient Iterative Method Based on Two-Stage Splitting Methods to Solve Weakly Nonlinear System. *Mathematics*. 2019. Vol. 7, Iss. 9. 815. DOI: 10.3390/math7070815
10. Cordero A., Jordan C., Sanabria E., Torregrosa J. R. A New Class of Iterative Processes for Solving Nonlinear Systems by Using One Divided Differences Operator. *Mathematics*. 2019. Vol. 7, Iss. 9. 776. DOI: 10.3390/math7070776
11. Tyupin V. N. Blasting and Geomechanical Processes in High-Stress Fractured Rock Mass. Belgorod, 2017. 191 p.
12. Kutuzov B. N., Tyupin V. N. Drilling and blasting design method to ensure preset fragmentation of rocks in open pit mining. *Gornyy Zhurnal*. 2017. No. 8. pp. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.12
13. Tyupin V. N. Determination of safe distances when conducting mass explosions near the processed space in the cracked mountain massives. *Vzryvnoye delo*. 2019. No. 122/79. pp. 180–194.
14. Tyupin V. N. Establishment of dynamically steady sizes of exposures of the jointed intense massif at chamber options of systems of development. *Vestnik Zabayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. Vol. 22, No. 6. pp. 31–39.

УДК 622.583:622.271

## ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ОБВОДНЕННОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ



**В. И. ТИТОВ**  
главный специалист,  
Titov\_VI@viogem-sp.ru



**Н. И. ЗАБУСОВ**  
старший научный сотрудник



**М. В. РЯЖСКИЙ**  
старший научный сотрудник



**Н. А. ЛУКЬЯНЕНКО**  
инженер

Показана методика изучения гидрогеологической обстановки в пределах обрабатываемого карьерного поля.

**Ключевые слова:** карьер, гидрогеологическое обследование, тепловизионная съемка, гидродинамическая балансовая схема потока подземных вод, численная геофильтрационная модель, проектная документация.

выполнял проекты осушения для месторождений европейской части России, Урала, Сибири и Дальнего Востока, а также ближнего и дальнего зарубежья.

Разработанная в институте методология гидрогеологического обоснования проектов отражает современный подход к решению сложных задач по осушению месторождений, а инновационные способы осушения позволяют эффективно осваивать минеральные объекты в сложных гидрогеологических условиях [1–9].

Комплексное изучение сложившейся гидрогеологической обстановки на этапе обработки месторождения карьером позволяет в дальнейшем выработать наиболее оптимальные технические решения по снижению обводненности его бортов.

### Введение

Традиционным направлением деятельности ВЮГЕМ является разработка систем осушения действующих и проектируемых горнодобывающих предприятий. Институт в различные годы

### Методика гидрогеологического обследования бортов карьера

На степень обводненности бортов карьера влияет множество факторов. К ним относятся особенности геологического строения