



Научная статья

УДК 550.8.05:550.853:550.856

EDN: MJNOWB

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-335-349



Применение методики анализа массовой трещиноватости для оценки устойчивости массива горных пород Ирокиндинского золоторудного месторождения

И.В. Матвеева^{a✉}, С.А. Бузов^b, О.А. Матвеев^c, Т.О. Шигарова^d

^{a-d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Основными структурными особенностями породного массива, определяющими его механические и деформационные свойства и, как следствие, его устойчивость, являются трещиноватость, блочность и слоистость, а также собственно состав горных пород. Большое количество открытых мелких трещин на стенах выработок проявляется также при взрывных работах и механизированной проходке, что занижает основные структурные показатели массива и приводит к ухудшению прогноза устойчивости согласно системе З.Т. Бениавски, часто применяемой на практике. Целью инженерно-геологического изучения массивной трещиноватости глубоких горизонтов Ирокиндинского золоторудного месторождения являлась качественная оценка свойств массива, приближенная количественная оценка свойств массива расчетным путем и выделение опасных интервалов на фоне всего горного массива. Наличие уточненных данных о трещиноватости массива горных пород позволяет корректировать класс устойчивости в сторону как увеличения, так и уменьшения, в том числе и при проходке горных выработок, а также обозначить перспективные направления в изучении закономерностей распространения трещин при ведении взрывных работ и их влиянии на сохранность законтурного массива и управления взрывами с целью уменьшения воздействия на массив горных пород. Полученные результаты качественного и количественного изучения трещиноватости интерпретировались с точки зрения их генетического происхождения с целью интерполяции оценки параметров трещиноватости и показателей свойств горных пород в массиве и возможности их учета при расчете устойчивости горных выработок по различным методикам. На основе полученных материалов документации стенок горных выработок и изучения керна скважин создана 3D-модель отдельных участков Ирокиндинского золоторудного месторождения, позволяющая повысить точность районирования массива горных пород для решения актуальных производственных задач – прогнозирования геомеханических процессов и совершенствования методов управления ими.

Ключевые слова: устойчивость горных пород, трещиноватость, структурные блоки, системы трещин, выветривание, законтурный массив

Для цитирования: Матвеева И.В., Бузов С.А., Матвеев О.А., Шигарова Т.О. Применение методики анализа массовой трещиноватости для оценки устойчивости массива горных пород Ирокиндинского золоторудного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 335–349. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-335-349>. EDN: MJNOWB.

Original article

Application of mass fracturing analysis to assess Irokinda gold deposit rock mass stability

Irina V. Matveeva^{a✉}, Sergey A. Buzov^b, Oleg A. Matveev^c, Tatiana O. Shigarova^d

^{a-d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The main structural features of a rock mass that determine its mechanical and deformational properties and, consequently, its stability are fracturing, blockiness, and layering, as well as the rock composition itself. A large number of small open cracks on the walls of workings also appear during blasting and mechanized excavation, which underestimates the main structural parameters of the massif and deteriorates the stability forecast according to the Z.T. Bieniawski system, which is frequently used in practice. The purpose of the engineering-geological study of mass fracturing of the deep horizons of the Irokinda gold deposit was: qualitative assessment of the rock mass properties, approximate quantitative assessment of the rock mass properties by calculation, and identification of hazardous intervals within the entire rock mass. The availability of refined data on rock mass fracturing allows for both upward and downward adjustments to the stability class, including those during mine development. It also identifies promising areas for studying crack propagation patterns during blasting operations and their impact on the integrity of the peripheral rock mass, as well as blast control

to reduce the impacts on the rock mass. The obtained results of the qualitative and quantitative fracturing study were interpreted in terms of their genetic origin to interpolate the estimates of fracturing parameters and rock property indicators in the massif and the possibility of taking them into account when calculating the stability of mine workings using various methods. Based on the obtained documentation materials of the mine walls and the study of borehole cores, a 3D model of individual sections of the Irokinda gold deposit was created. It allows to improve the accuracy of rock mass zoning for addressing current production challenges, such as predicting geomechanical processes and improving their management methods.

Keywords: rock mass stability, fracturing, structural blocks, fracture systems, weathering, peripheral rock mass

For citation: Matveeva I.V., Buzov S.A., Matveev O.A., Shigarova T.O. Application of mass fracturing analysis to assess Irokinda gold deposit rock mass stability. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):335-349. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-335-349>. EDN: MJNOWB.

Введение

Необходимость специального изучения геометрии систем трещин как предварительного условия для построения трещиноватых массивов была ясна исследователям с первых попыток систематического изучения геологической трещиноватости. Трещина является естественным итогом развития различных процессов в геологической среде и возникает тогда, когда определенная функция механических напряжений превосходит некоторый характерный для данного состояния предел, так называемый критическим уровнем разрушения. Генетический тип трещины фиксирует тип механического состояния геологической среды в момент образования этой трещины, масштаб которой характеризует в свою очередь энергетический потенциал трещинообразующего процесса.

Таким образом, геологическая трещина представляет собой сложный физико-механический объект, обладающий обширным набором качественных и количественных характеристик. Важной особенностью геологической трещиноватости является ее массивный характер, в связи с чем наряду с изучением формы и строения отдельных трещин первостепенное значение при полевом исследовании приобретает изучение скрытой статистической упорядоченности строения и свойств систем трещин.

Взрывные работы – неотъемлемый важнейший процесс горной технологии, от которого зависят последующие процессы добычи и переработки полезного ископаемого, а также дальнейшего безопасного существования горной выработки. В этой связи особую значимость при обработке замеров массовой трещиноватости представляют статистическое описание и анализ параметров ориентации плоскостей трещин, являющиеся отдельной самостоятельной задачей и требующие для их интерпретации применения специальных методик математического описания с учетом

физико-механических и геологических особенностей вмещающего эту сеть массива горных пород. Численное моделирование становится важным инструментом для прогнозирования взаимодействия горной породы и буровзрывных работ.

Цель выполненного нами исследования заключалась в проведении массовых статистических измерений параметров трещиноватости в горных выработках Ирокиндинского золоторудного месторождения для выделения групп трещин различной ориентировки, анализа факторов их пространственного изменения и степени их предрасположенности к обрушению.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись стены подземных горных выработок жилы Медвежья НТС-2, в которых выполнены структурная документация выделенных блоков массива горных пород, массовые замеры трещиноватости, опробование и определение физико-механических свойств пород. Всего выполнено более 10 000 замеров трещиноватости с ПКО по ПК100, отобрано и проанализировано 200 проб горных пород.

Основную часть площади Ирокиндинского месторождения занимает киндиканская толща архейского возраста, которая представлена парагнейсами, параамфиболитами, кристаллосланцами, кальцифирами и мраморами, часто метаморфизованными от зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фаций.

Для всех изученных участков характерно частое переслаивание гнейсов, гнейсов беретизированных, гнейсов мигматизированных и мигматитов от очень прочных до средней прочности. Вся толща разбита тектоническими нарушениями в виде разрывов различной морфологии, зон дробления, рассланцевания, будинажа и милонитизации.



Как известно, параметры трещин определяют устойчивость горных выработок, прочность на сдвиг, деформируемость и водопроницаемость скальных массивов¹ [1, 2].

Однако для решения каждой конкретной инженерной задачи применяется своя много-параметрическая модель трещиноватости.

Так, для расчета деформаций допустимо использование средней ширины трещин b , от которой зависит модуль деформации. Для оценки фильтрационных свойств массива наиболее важным параметром является ширина раскрытия трещин [3].

Для решения поставленной задачи – расчета устойчивости скального массива с системами трещин – определялись генетический тип трещин, тип трещин по степени раскрытия и характеристике заполнителя, характер поверхности и измерялись такие параметры систем трещин, как азимут падения, угол падения, длина и расстояние между трещинами.

Особое внимание при полевых замерах и обработке результатов замеров массовой трещиноватости уделялось описанию и анализу параметров ориентации плоскостей трещин по отношению к оси горной выработки с целью корректировки устойчивости массива горных выработок, полученной по другим методикам, в частности по З.Т. Беняевски. В этой связи принималось во внимание:

- отражение только существенных для данной задачи черт структуры массива;
- пригодность для расчета устойчивости горной выработки современными методами;
- включение в расчет только тех параметров трещиноватости, которые могут быть определены в исследуемом массиве доступными для изысканий методами.

Результаты исследований и их обсуждение

Во время подготовительного этапа была составлена эталонная коллекция литологических разностей вмещающих пород,rud

и вариантов заполнителей трещин объекта исследований. Основной этап заключался в инструментальных замерах параметров залегания трещин и систем трещин, а также в визуальном обследовании горных выработок:

- разметке метража горных выработок и выделении интервалов и блоков;
- фотографировании стенок выработки в пределах одного интервала;
- заполнении альбома документации с зарисовкой стенки;
- заполнении журнала трещин и журнала структурных блоков;
- отборе проб горных пород.

Документация проводилась в строгой привязке к маркшейдерским планам. Особое внимание уделялось горным выработкам, проходящим вкrest залегания пород и рудных тел и пересекающим одинаковые структуры и комплексы. Погрешность в определении структур на общем плане не превышала 1 м [4–7].

Анализ состояния массива горных пород по ориентировке трещиноватости в процессе камеральной обработки эмпирио-аналитическими методами сводился к оценке его устойчивости и основывался на выделении групп трещин различной степени предрасположенности к обрушению. Выделялись группы по двум критериям: углу падения и азимуту простирации трещин.

При распределении трещин по углу падения относительно угла наклона ствола скважины выделены три группы устойчивости согласно табл. 1.

При распределении трещин по азимутам простирации главным критерием являлась длина плоскости разлома, пересекающей горную выработку, и угол между азимутами простирации выработки и системы трещин. При этом наименьшая длина плоскости разлома являлась благоприятным фактором, а наибольшая – осложняющим. Согласно вышеописанному признаку выделены три группы трещин, приведенные в табл. 2 [6].

Таблица 1. Группы трещин по углу падения относительно угла наклона ствола скважины
Table 1. Fracture sets by dip angle relative to borehole inclination angle

Наименование группы	Углы падения трещин относительно угла наклона ствола выработки
Устойчивые	0–29°
Слабоустойчивые	30–59°
Неустойчивые	60–90°

¹ Рекомендации по изучению трещиноватости горных пород при инженерно-геологических изысканиях для строительства. М.: Стройиздат, 1974. 39 с.

Таблица 2. Группы трещин по азимуту простирания относительно азимута простирания выработки
Table 2. Fracture sets by strike azimuth relative to heading azimuth

Наименование группы	Угол падения между азимутами простирания выработки и системы трещин
Благоприятные	-60...120° +60...120°
Неблагоприятные	-30...59° (-121...150°) +30...59° (+121...150°)
Весьма неблагоприятные	0...29° (-151...180°) 0...29° (+151...180°)

Например, для выработки с простиранием 45° (рис. 1):

- благоприятными будут системы с простиранием 345–285° и 105–165°;
- неблагоприятными будут системы с простиранием 346–15°; 284–55° и 75–104°; 166–195°;
- весьма неблагоприятными будут системы с простиранием 16–45°; 225–254° и 45–74°; 196–225°.

После распределения всех трещин по трем типам групп формировалась общая таблица распределения массовой трещиноватости, где в каждую клетку записывалось значение количества трещин (процент от общего числа), попавших в общую группу (по углу падения и азимуту простирания).

В качестве примера рассмотрим интервал ПК0–ПК10 жилы Медвежья НТС-2, который условно был разделен нами на блоки МН-1–МН-10 (рис. 2, табл. 3).

Породы описываемого интервала ПК0–ПК6, представленные гранито-гнейсами и характеризующиеся преобладанием трещин скола, слагают предступьевую часть массива, находящуюся вблизи дневной поверхности и подверженную воздействию экзогенных процессов (рис. 3). Осложняющим фактором является наличие системы трещин, субпараллельной выработке, на ПК4–ПК6. В целом интервал рассматривается как массив со слабой устойчивостью. Породы с ПК6 до ПК10 характеризуются сменой классов устойчивости

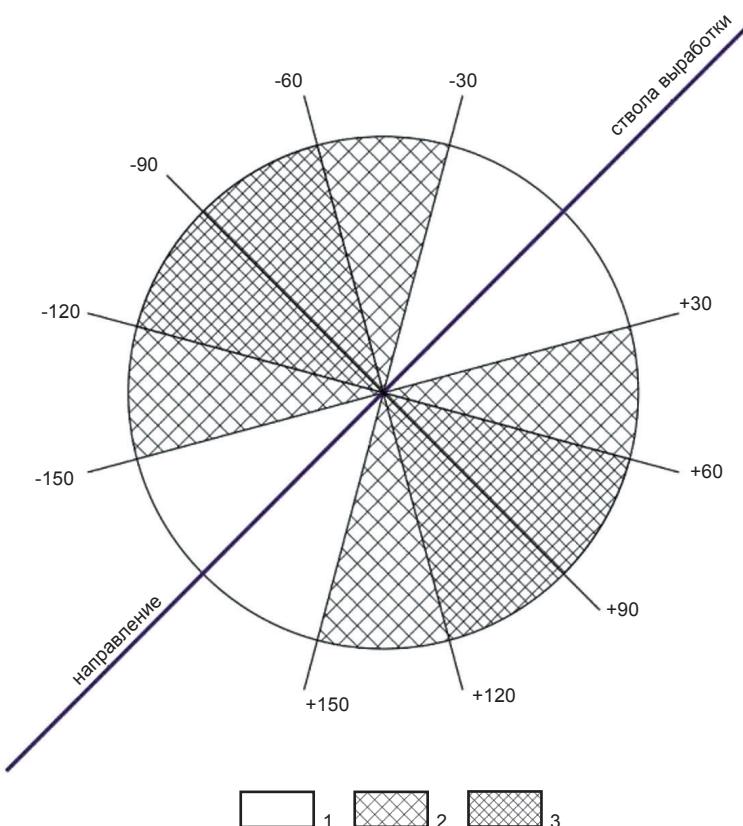


Рис. 1. Распределение групп трещин по азимуту простирания для выработки с простиранием 45°:
1 – весьма неблагоприятная группа; 2 – неблагоприятная группа; 3 – благоприятная группа

Fig. 1. Fracture sets distribution by strike azimuth for a 45° strike drift:

1 – most disadvantageous group; 2 – disadvantageous group; 3 – advantageous group

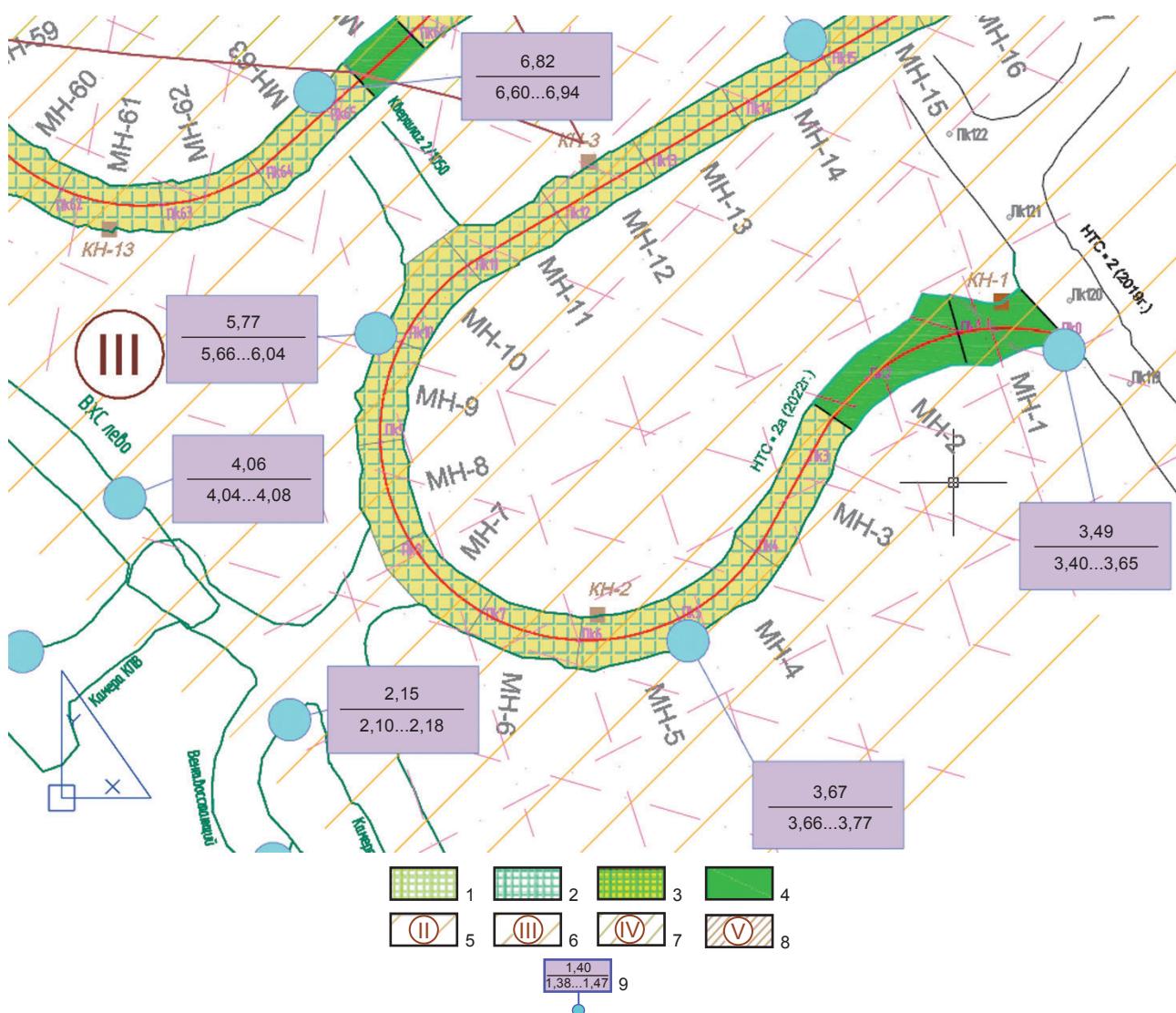


Рис. 2. НТС-2 с выделенными участками структурных блоков:

1–4 – модуль трещиноватости пород в блоке: 1 – 1,5–5 т/м (слаботрещиноватые), 2 – 5–10 т/м (среднетрещиноватые), 3 – 10–30 т/м (сильнотрещиноватые), 4 – более 30 т/м (очень сильнотрещиноватые);

5–8 класс состояния скальных массивов (на планах и разрезах): 5 – хорошая скала, 6 – средняя скала

7 – плохая скала, 8 – очень плохая скала; 9 – точка замеров температуры горного массива: в числителе – средняя температура, $^{\circ}\text{C}$, за 2022 г. на точке, в знаменателе – амплитуда колебания температур (min, max).

Fig. 2 NTS-2 with highlighted structural blocks:

Fig. 2. NTS-2 with highlighted structural blocks.
 1–4 – rock fracturing modulus in the block: 1 – 1.5–5 fractures per metre (slightly fractured), 2 – 5–10 fractures per metre (moderately fractured), 3 – 10–30 fractures per metre (heavily fractured), 4 – more than 30 fractures per metre (very heavily fractured); 5–8 – rock mass condition class (on plans and sections): 5 – good rock, 6 – average rock, 7 – poor rock, 8 – very poor rock; 9 – rock mass temperature measurement point: numerator – average temperature, °C, for 2022 at the point, denominator – temperature fluctuation amplitude (min...max)

с III на IV и обратно, что связано с различной степенью сгущения систем трещиноватости при однообразной литологической и гидрогеологической ситуации. С ПК9 до ПК10 отмечаются зоны интенсивного рассланцевания [5, 6].

Преобладающая ориентировка трещин с ПК0 по ПК10 – северо-западного направления. Породы в блоке МН-1–МН-2 (см. рис. 2) очень сильно трещиноватые, модуль трещиноватости – более 30 тр/м. Модуль трещиноватости блоков МН-3–МН-10 от 10 до 30 тр/м,

что характеризует породы как сильнотрещиноватые. Встречаются зоны тектонического дробления и катаклаза.

На полевом этапе заполнялись журналы с массовыми замерами трещин по однородным интервалам и общей характеристикой с первичным распределением по системам трещин. Далее, как указывалось выше, выделялись группы по двум критериям: углу падения и азимуту простирания трещин. По углу падения относительно угла наклона ствола



Таблица 3. Журнал структурных блоков МН-1–МН-10 жилы Медвежья НТС-2
Table 3. Journal of structural blocks MN-1–MN-10 of the Medvezhya NTS-2 vein

Номер блока	Интервал			Общая трещиноватость интервала					
	От, м	До, м	Длина, м	Модуль трещиноватости	Длина качественных отрезков, м	Коэффициент качественных блоков	Минимальное расстояние между трещинами, см	Максимальное расстояние между трещинами, см	Среднее расстояние между трещинами, см
МН-1	0	10	10	31	0,30	30	2	10	6
МН-2	10	25	15	31	0,35	35	1	13	7
МН-3	25	40	15	27	0,58	58	23	20	21,5
МН-4	40	50	10	22	0,48	48	3	13	8
МН-5	50	60	10	20	0,55	55	4	15	9,5
МН-6	60	70	10	20	0,62	62	4	18	11
МН-7	70	80	10	18	0,81	81	5	28	16,5
МН-8	80	90	10	21	0,53	53	2	21	11,5
МН-9	90	100	10	20	0,54	54	1	17	9
МН-10	100	110	10	25	0,46	46	2	20	11



Рис. 3. Фотография структурного блока МН-2 (ПК1–ПК2) жилы Медвежья НТС-2
Fig. 3. An image of the structural block MN-2 (PC1-PC2) of the Medvezhya NTS-2 vein

выработки выделены три группы устойчивости: устойчивые ($0\ldots29^\circ$), слабоустойчивые ($30\ldots59^\circ$) и неустойчивые ($60\ldots90^\circ$).

При распределении трещин по азимуту простирания относительно азимута простирания выработки трещины подразделены на благоприятные ($-60\ldots120^\circ$ и $+60\ldots120^\circ$), неблагоприятные ($-30\ldots59^\circ$ ($-121\ldots150^\circ$)

и $+30\ldots59^\circ$ ($+121\ldots150^\circ$)) и весьма неблагоприятные ($0\ldots29^\circ$ ($-151\ldots180^\circ$) и $0\ldots29^\circ$ ($+151\ldots180^\circ$)).

Итоговая табл. 4, учитывающая, с одной стороны, угол падения и азимут простирания трещин, с другой – их положение относительно оси выработки, позволяет отнести обследованный горный массив в определен-



ном интервале горной выработки к тому или иному типу устойчивости согласно методики многопараметрической классификации З.Т. Беняевски [5].

После распределения всех замеров трещин в интервале блока МН-1–МН-2 по двум

типам групп составлена сводная таблица распределения массивовой трещиноватости и выполнена обработка 100 замеров трещин на выделенном структурном блоке МН-2 с однородными литологическими параметрами (табл. 5).

Таблица 4. Классификация устойчивости массивов горных пород по методике на основе анализа распределения массивовой трещиноватости

Table 4. Classification of rock mass stability based on the analysis of mass fracturing distribution

Наименование класса устойчивости (по углу падения относительно угла наклона ствола выработки) / Наименование подкласса устойчивости (по углу между азимутами простирации выработки и системы трещин)	Благоприятный (-60...120° и +60...120°)	Неблагоприятный (-30...59° и +30...59°) (-121...150° и +121...150°)	Весьма неблагоприятный (0...29° и 0...29°) (-151...180° и +151...180°)
Устойчивый (0...29°)	Ia очень хорошая скала	Ib хорошая скала	Ib хорошая скала
Слабоустойчивый (30...59°)	IIa средняя скала	IIb средняя скала	IIb плохая скала
Неустойчивый (60...90°)	IIIa плохая скала	IIIb очень плохая скала	IIIb очень плохая скала

Таблица 5. Результаты документации массивовых замеров трещин блока МН-2 (ПК1–ПК2)

Table 5. Documentation results of mass measurements of MN-2 (PC1–PC2) cracks

Номер трещины	Тип трещины	Угол падения	Азимут падения	Генетический тип трещины	Характер поверхности трещины	Мощность заполнителя, см	Заполнитель	Данные эмпирио-аналитической обработки					
								Благоприятные			Неблагоприятные		
1	отк.	45	232	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	1	0
2	отк.	86	339	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	1
3	отк.	22	284	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	ск.	...	...	...	...	...	...	...	...	...
90	отк.	63	246	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	1
91	отк.	32	68	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	1	0
...	...	...	...	ск.	...	...	...	...	...	...	...	...	...
98	отк.	79	253	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	1
99	отк.	21	61	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	1	0	0
100	отк.	74	268	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	0
Итого								4	7	22	4	16	18
Класс устойчивости								Ia	IIa	IIIa	Ib	IIb	IIIb
											Ib	IIb	IIIb

Примечание. Отк. – открытый тип трещин; ск. – трещины скола; шерх. – шероховатые.



Общая характеристика устойчивости массива пород интервала МН-2 дана на основе полученного результата обработки замеров массовой трещиноватости блока МН-2 (табл. 6).

Основанием для отнесения отдельного интервала к какому-либо классу устойчивости служит преодоление 50 % порога в распределении массовых замеров трещин, т. е. полученное распределение трещин в процентном соотношении складывается между собой, начиная от неустойчивого и так до получения 50% и более или в обратном направлении, начиная от устойчивого (табл. 7).

Оба расчета по распределению трещин в процентном соотношении в зависимости от угла и азимута падения по отношению к оси выработки (от неустойчивых к устойчивым или от устойчивых к неустойчивым) показывают сходимость результата отнесения массива пород блока МН-2 к неустойчивому благоприятному.

Согласно расчетам, проведенным выше, 50 % порог был преодолен в графе «неустойчивые – благоприятные», следовательно, данному блоку присваивается класс устойчивости IIIa – плохая скала (см. табл. 4).

По результатам камеральной обработки выполненных замеров трещиноватости в программе Rocscience Dips построены усреднен-

ные круговые диаграммы по сетке Фишера – сферограммы, которые представляют собой графики, изображающие плотности вероятностей направлений ориентировки трещин, учитывающей изображение плотностей вероятностей двух переменных. Этими переменными являлись замеры массовой трещиноватости, определяющие пространственное положение – угол и азимут падения трещины^{2,3} [8].

Построенные диаграммы позволяют с достаточной точностью определять углы между конкретными трещинами или системами трещин, пространственную ориентировку линий скрещения трещин, а также анализировать взаимоотношения между трещиноватостью, с одной стороны, и элементами складок, напластованием, разрывными нарушениями, контактами интрузивных массивов, жил, даек, рудных тел и т. п., с другой.

При интерпретации диаграмм необходимо учитывать, что процент максимума той или иной системы фиксирует среднее значение угла и азимута падения трещин данной системы, а размер площадки, занимаемой на диаграмме в изолиниях данной системой трещин, характеризует степень изменчивости ориентировки единичных трещин: чем больше площадка, тем больше дисперсия ориентировки трещин [9–11].

Таблица 6. Распределение массовой трещиноватости блока МН-2
Table 6. Distribution of MN-2 block mass fracturing

Характеристика азимута/угла	Благоприятные	Неблагоприятные	Весьма неблагоприятные
Устойчивые	4 (4 %)	4 (4 %)	3 (3 %)
Слабоустойчивые	7 (7 %)	16 (16 %)	14 (14 %)
Неустойчивые	22 (22 %)	18 (18 %)	12 (12 %)

Таблица 7. Расчет класса блоков по распределению массовых замеров трещиноватости
Table 7. Block class calculation based on the distribution of mass measurements of fracturing

Характеристика азимута/угла	Благоприятные	Неблагоприятные	Весьма неблагоприятные
Расчет от неустойчивых к слабоустойчивым и устойчивым			
Устойчивые	4 %	4 %	3 %
Слабоустойчивые	7 %	16 %	14 %
Неустойчивые	30 % + 22 % = 52 %	12 % + 18 % = 30 %	12 %
Расчет от устойчивых к слабоустойчивым и неустойчивым			
Устойчивые	7 % + 4 % = 11 %	3 % + 4 % = 7 %	3 %
Слабоустойчивые	11 % + 7 % = 18 %	18 % + 16 % = 34 %	34 % + 14 % = 48 %
Неустойчивые	48 % + 22 % = 70 %	18 %	12 %

² ПЭК А.В. Трещинная тектоника и структурный анализ / ред. А.Д. Архангельский. М., Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1939. 152 с.

³ Родыгин А.И. Структурные диаграммы. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. 76 с.

Главный максимум трещиноватости приходится на трещины северо-западного простирания, падающие под углом 70° на северо-восток (рис. 4). Второстепенный максимум образован трещинами северо-западного простирания, падающими под углом 50° на юго-запад. Плотность этих трещин относительно невелика. Присутствует еще одна немногочисленная группа трещин северо-западного простирания, отличающаяся северо-восточным азимутом падения и более пологими углами падения (до 20°).

Основным назначением применения методики анализа массовой трещиноватости является выделение опасных интервалов на фоне всего горного массива. Так, массив горных выработок интервала ПК0–ПК3 характеризуется очень сильной степенью трещиноватости, что должно рассматриваться как сигнал для принятия проектных решений об укреплении горных выработок, а также определения рационального состава и объема полевых работ

для детальной оценки прочностных и деформационных свойств интервала.

Классы устойчивости, рассчитанные на основе методики анализа распределения массовой трещиноватости, применены нами для корректировки классов по методике многопараметрической классификации З.Т. Беняевски, которая дает очень усредненную картину в силу высокого влияния механического воздействия на породы при проходке ствола выработки и детально описана ранее [5].

Изучение трещиноватости также позволяет обозначить перспективные научные направления изучения закономерностей распространения трещин при ведении взрывных работ и управления взрывами с целью сохранности контурного массива, который в свою очередь обеспечивает устойчивость горной выработки.

Трещиноватость является определяющей структурно-механической особенностью по-

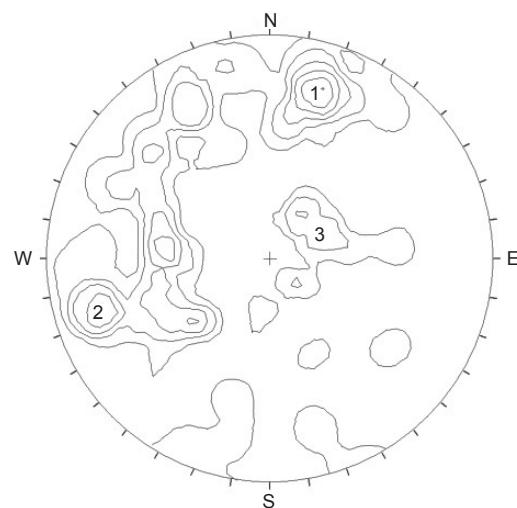


Рис. 4. Фотография структурных блоков МН-1–МН-4 (ПК0–ПК4) и сферограмма ПК0–ПК10
Fig. 4. An image of MN-1–MN-4 (PC0–PC4) structural blocks and a PC0–PC10 spherogram



родного массива и влияет на качество дробления пород. Согласно статистике, при взрыве на 65–70 % массив разрушается по имеющимся трещинам и только на 25–30% – по вновь образованным⁴ [12–17].

Выбор рациональной схемы производства буровзрывных работ основывается, главным образом, на качественной оценке геолого-структурных особенностей разрабатываемого массива, ключевым звеном которой является определение степени трещиноватости и раздробленности пород [18].

Так, снижение выхода негабарита и повышение степени дробления взорванной массы в зависимости от структурного строения массива и направления простирания основных систем трещин без существенного увеличения затрат могут обеспечиваться уменьшением длины взрывного блока, оптимизацией сетки скважин или интервалов времени замедления и порядка, а также таким направлением фронта отбойки, при котором трещины основной системы создают отраженную волну напряжений.

Оконтуривание взрывного блока рядом скважин малого диаметра, повышение удельного расхода взрывчатых веществ за счет сгущения сетки скважин и уменьшение диаметра взрывных скважин потребуют увеличения затрат на буровзрывные работы.

Однако все указанные пути решения проблемы могут иметь место при определенных условиях и ограничениях.

На сегодняшний день вопрос обследования трещиноватости для проведения буровзрывных работ с целью снижения выхода негабарита и влияния на сохранность залежного массива освещен недостаточно.

В этой связи недостаток детальной информации указывает на актуальность изучения закономерностей распространения трещин для проектирования как процессов проходки горных выработок, так и безопасного ведения собственно добычных работ.

Концепцию оценки состояния массива горных пород для обеспечения устойчивости горных выработок, прогнозирования и управления геомеханическими процессами можно изобразить в виде схемы, отображающей алгоритм действий, основой которой является геомеханический мониторинг, а результатом –

создание базы данных для построения интерактивной карты состояния массива горных пород (рис. 5).

В последнее время для получения точных данных о структуре горного массива все чаще используются технологии лазерного сканирования при помощи ручных сканеров типа LiGrip, обладающие рядом преимуществ: высокой точностью, большой скоростью сбора данных, безопасностью и возможностью детального мониторинга изменений в условиях недостаточного освещения и сложной геометрии выработок. В отличие от традиционных методов измерений лазерное сканирование позволяет собрать информацию о поверхности с высокой точностью и разрешением для построения детализированных 3D-моделей.

Исследование распространения трещиноватости вглубь массива наравне с изучением в стенках горных выработок также является важным этапом в изучении трещинно-блочной структуры горного массива. Однако изучение керна и применение различных геофизических методов в скважинах не позволяют с достаточной точностью установить позиции плоскостей ослабления массива и их пространственную ориентировку.

Для этих целей в настоящее время все чаще используется фото-видеометрический метод исследования поверхностей стенок скважин посредством скважинных фотоаппаратов и телеметрических устройств, предназначенных для изучения естественной трещиноватости и блочности горных пород в условиях их естественного залегания. Изображение, получаемое с видеокамер скважинного зонда, передается на персональный компьютер, который производит запись видео на жесткий диск и вывод изображения на дисплей, что позволяет установить позицию и ориентировку блокообразующих трещин и оценить размеры блоков горных пород.

Оконтуривание участков пород различной блочности и трещиноватости проводится путем увязки границ интервалов одной категории с учетом данных по изучению керна, геофизических исследований скважин и обследования горных выработок.

Интересны в этом плане результаты исследований по районированию карьерного поля рудника «Железный» ОАО «Ковдор-

⁴ Мамбетов Ш.А. Геомеханика: учебник для студентов вузов, аспирантов, преподавателей. В 2 т. Т. 1. Основы геомеханики. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2013. 138 с.

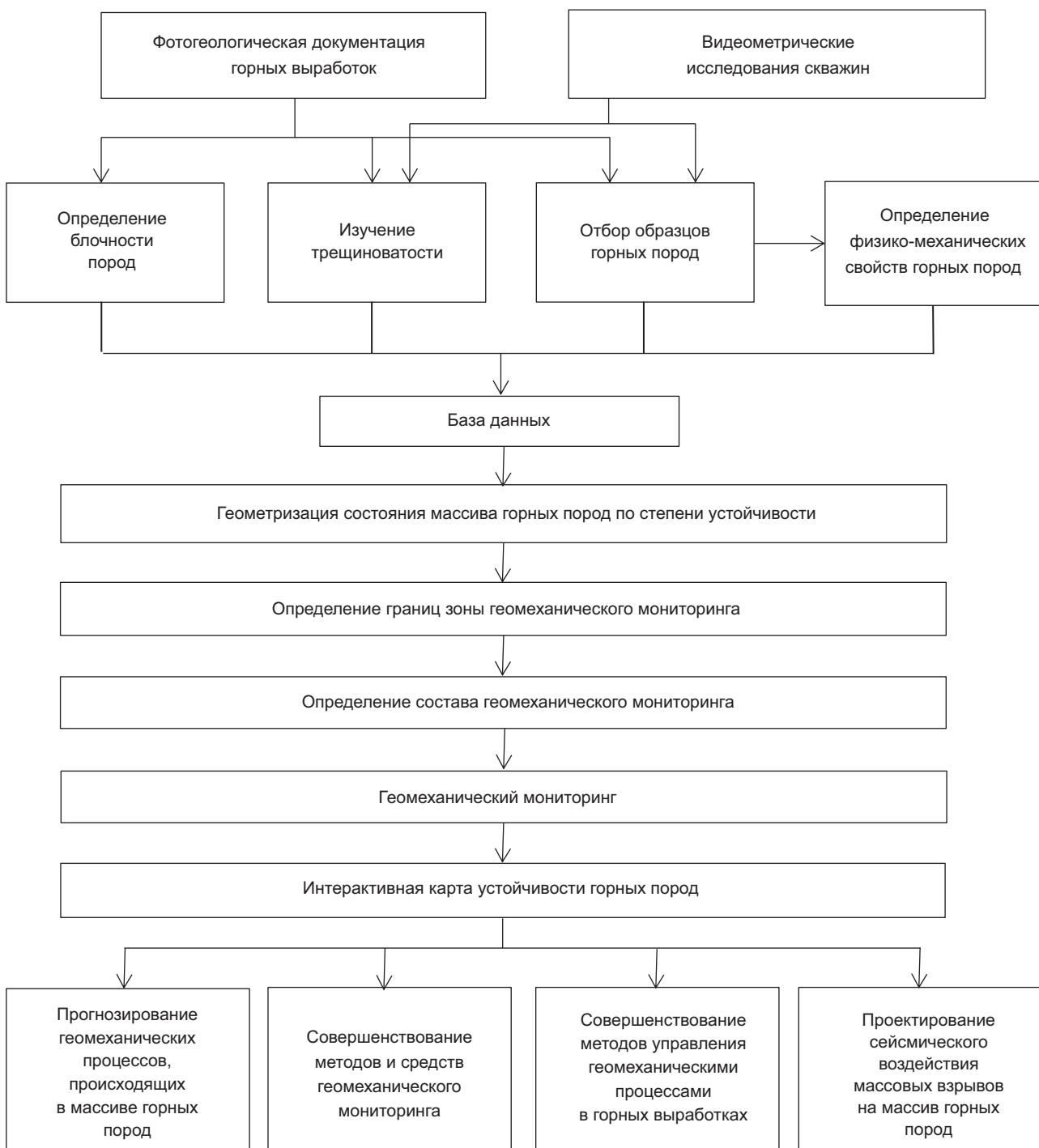


Рис. 5. Методика прогнозирования и управления состоянием массива горных пород
Fig. 5. Rock mass condition forecasting and management methodology

ский горно-обогатительный комбинат», основанные на применении современных технических средств и дистанционных способов фиксации первичной информации, итогом которых стала карта взываемости горных пород, позволившая автоматизировать процесс проектирования буровзрывных работ [19–21]. При этом сравнительный анализ данных ручного и дистанционного измерения

блочности пород показал их хорошую сходимость – 92–97 %.

В дальнейшем внедрение дистанционных способов фиксации первичной информации (подземных беспилотных летательных аппаратов и автосканов), оснащенных камерами видеонаблюдения, 3D лазерного сканирования или лидарами, позволит обеспечить создание 3D-моделей планов аварийных

горных выработок без непосредственного присутствия человека в ней [22]. После анализа напряженно-деформированного состояния породного массива в установленных опасных областях смещения пород и их математической обработки будет определена возможность или невозможность восстановления этого участка горной выработки. Данный метод основан на предложенной математической модели, учитывающей значения нормальных компонентов напряжений. В результате, если в данных областях смещений значения нормальных компонентов напряжений не превышают пределы прочности на растяжение горных пород, то горная выработка подлежит восстановлению. Однако на сегодняшний день внедрение этого метода затруднено из-за отсутствия критериев оценки полученной информации, по которой можно было бы судить о возможности восстановления горных выработок.

Заключение

Созданная на основе полученных материалов документации стенок горных выработок и изучении керна скважин 3D-модель отдельных участков Ирокиндинского месторождения позволяет взаимодействовать с базой данных

по трещиноватости внутри горного массива: строить планы изолиний выбранных значений, создавать погоризонтные планы трещиноватости и блочности пород, формировать выборки данных по различным параметрам, отображать данные в виде графиков и диаграмм, а также визуализировать данные по скважинам и горным выработкам как в двухмерном, так и в трехмерном пространстве.

Для дальнейшей реализации прогнозирования и управления состоянием массива горных пород первичную координатно привязанную информацию, полученную на основании документации стенок горных выработок и изучения керна скважин с отбором монолитов для физико-механических испытаний, необходимо дополнить видеометрическими исследованиями с занесением их в базу данных.

Использование комплексного подхода при проведении геомеханического мониторинга даст возможность повысить точность районирования массива горных пород для решения актуальных производственных задач – прогнозирования геомеханических процессов и совершенствования методов управления ими, а также проектирования взрывных работ с целью снижения выхода негабарита и влияния на сохранность контурного массива.

Список источников

1. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с. EDN: TSSIWT.
2. Кузьмин В.С., Копытин А.С. Применение компьютерных технологий для решения задач, связанных с изучением трещиноватости скальных массивов // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 3. С. 83–92. EDN: RCCTYZ.
3. Чернышев С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. М.: Недра, 1984. 111 с.
4. Чернов А.Ю., Бузов С.А. Применение рейтинговых классификаций массивов горных пород на основе общепринятой системы документации горных выработок // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (г. Пермь, 2–4 апреля 2019 г.). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. Вып. 1. С. 603–608. EDN: ZCOYLR.
5. Матвеева И.В., Шигарова Т.О., Матвеев О.А. Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 289–301. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.
6. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 4. С. 201–203. EDN: INTNKV.
7. Бурзунова Ю.П. Трещинные сети в породах тектонически активных регионов: оценка степени хаотичности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 45–50. EDN: SBNFHZ.
8. Михайлов А.Е. Полевые методы изучения трещин в горных породах. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 132 с.
9. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
10. Кноринг Л.Д. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л.: Наука, 1969. 87 с.
11. Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных смесятелей // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 330–343. EDN: IBCKNZ.
12. Васильева Л.А., Жариков С.Н., Кутуев В.А. О влиянии трещиноватости на качество дробления горных пород и на сохранность контурного массива // Проблемы недропользования. 2022. № 3. С. 66–72. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.066>. EDN: STYCFK.



13. Яковлев А.В., Шимкив Е.С. Исследование влияния основных систем трещин в массиве Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» на качество дробления взорванной горной массы // Проблемы недропользования. 2015. № 3. С. 19–25. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2015.03.019>. EDN: SIGSUI.
14. Яковлев А.В., Панжин А.А., Рождественский В.Н., Пьянзин С.Р., Kochnev K.A. Оценка степени трещиноватости локальных массивов, подлежащих взрывной отбойке // Маркшейдерия и недропользование. 2012. № 5. С. 22–29. EDN: PFQZSF.
15. Рождественский В.Н., Панжин А.А., Пьянзин С.Р., Kochnev K.A. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 5. С. 75–79. EDN: SKIZYT.
16. Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993. 319 с.
17. Барон Л.И., Личели Г.П. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке. М.: Недра, 1966. 135 с.
18. Овсянников А.Н., Игнатенко И.М., Яницкий Е.Б., Агарков И.Б. Методика оценки блочности горных пород в массиве и в откосах уступов карьера рудника «Железный» Ковдорского ГОКа // Информационная поддержка горной отрасли. Режим доступа: <https://2cad.ru/blog/science/metodika-otsenki-blochnosti-gornyh-porod/> (дата обращения: 08.07.2025).
19. Вознесенский А.С., Набатов В.В., Петерс Ш. Скважинные видеозонды и их использование для задач геотехнологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 9. С. 5–12. EDN: IBZVJZ.
20. Козырев С.А., Власова Е.А., Усачева Е.А. Инженерная методика оперативной оценки сейсмовзрывного воздействия на контурный массив в карьере // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 66–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-66-73>. EDN: FXDXTR.
21. Овсянников А.Н., Игнатенко И.М., Дунаев В.А. Районирование карьерного поля по взрываемости горных пород (на примере рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК») // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2015. Выпуск 32. № 15. С. 172–177. EDN: VAWIET.
22. Левкин Ю.М. Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок // Уголь. 2022. № 6. С. 32–34. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-32-34>. EDN: WJALGJ.

References

1. Rats M.V., Chernyshev S.N. *Fracture and properties of fractured rocks*. Moscow: Nedra; 1970, 164 p. EDN: TSSIWT. (In Russ.).
2. Kuzmin V.S., Kopytin A.S. Computer technologies application for the solution of the tasks of rocks fracturing investigation. *RUDN Journal of ecology and life safety*. 2013;3:83-92. (In Russ.). EDN: RCCTYZ.
3. Chernyshev S.N. *Rock fracturing and its influence on slope stability*. Moscow: Nedra; 1984, 111 p. (In Russ.).
4. Chernov A.Y., Buzov S.A. Application of rating classifications of rock massifs based on the generally accepted system of mine working documentation. In: *Sergeevskie chteniya: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii = Sergeev Readings: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. 2–4 April 2019, Perm. Perm: Perm State University; 2019, vol. 1, p. 603-608. (In Russ.). EDN: ZCOYLR.
5. Matveeva I.V., Shigarova T.O., Matveev O.A. Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):289-301. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUIMMB.
6. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. Rating classifications of rock massifs: creation background, development and application scope. *Mining information and analytical bulletin*. 2004;4:201-202. (In Russ.). EDN: INTNKV.
7. Burzunova Yu.P. Joint systems in rocks of active tectonic regions: irregularity degree estimation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;4:45-49. (In Russ.). EDN: SBNFHZ.
8. Mikhailov A.E. *Field methods of studying rock cracks*. Moscow: Gosgeoltekhnizdat; 1956, 132 p. (In Russ.).
9. Gzovsky M.V. *Fundamentals of tectonophysics*. Moscow: Nauka; 1975, 536 p. (In Russ.).
10. Knoring L.D. *Mathematical methods in studying the mechanism of tectonic fracturing formation*. Leningrad: Nauka; 1969, 87 p. (In Russ.).
11. Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P. Interpretation of chaotic jointing near fault planes: a new approach. *Russian Geology and Geophysics*. 2007;48(3):330-343. (In Russ.). EDN: IBCKNZ.
12. Vasilyeva L.A., Zharikov S.N., Kutuev V.A. On the effect of fracturing on the quality of rock crushing and on the safety of the out-contour rock mass. *Problems of Subsoil Use*. 2022;3:66-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.066>. EDN: STYCFK.
13. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S. Studying the main cracks systems influence in rock mass of the “EVRAZ KGOK” northern open pit on the quality of blasted rock mass crushing. *Problems of Subsoil Use*. 2015;3:19-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2015.03.019>. EDN: SIGSUI.
14. Yakovlev A.V., Panzhin A.A., Rozhdestvenskii V.N., P'yanzin S.R., Kochnev K.A. Assessment of the degree of jointing of the blastable local rock masses. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2012;5:22-29. (In Russ.). EDN: PFQZSF.
15. Rozhdestvenskii V.N., Panzhin A.A., Pyanzin S.R., Kochnev K.A. Study of fracturing of local masses by using the ground laser scanning. *Minerals and Mining Engineering*. 2014;5:75-79. (In Russ.). EDN: SKIZYT.



16. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Geomechanics of large-scale explosions*. Moscow: Nedra; 1993, 319 p. (In Russ.).
17. Baron L.I., Licheli G.P. *Rock fracturing during blasting*. Moscow: Nedra; 1966, 135 p. (In Russ.).
18. Ovsyannikov A.N., Ignatenko I.M., Yanitsky E.B., Agarkov I.B. Methodology for assessing the block structure of rock massifs and bench slopes in the Zhelezny Mine of the Kovdor Mining and Processing Plant. *Information support for the mining industry*. Available from: <https://2cad.ru/blog/science/metodika-otsenki-blochnosti-gornyh-porod/> [Accessed 8th July 2025]. (In Russ.).
19. Voznesensky A.S., Nabatov V.V., Peters Sh. Borehole video probes and their use for geotechnological tasks. *Mining information and analytical bulletin*. 2007;9:5-12. (In Russ.).
20. Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Usachev E.A. Engineering methodology for operative assessment of seismic blast impact in the boundary rock mass in open pits. *Russian Mining Industry*. 2024;5:66-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-66-73>. EDN: FXDXTR.
21. Ovsyannikov A.N., Ignatenko I.M., Dunaev V.A. Methods of zoning of quarry field in explosiveness of rocks (on example mine "Zhelezny" of OJSC "Kovdorsky GOK"). *Belgorod State University Scientific Bulletin Natural Sciences*. 2015;32(15):172-177. (In Russ.). EDN: VAWIET.
22. Levkin Yu.M. The usage of remote sensing technology and mathematical modeling for the analysis of emergency mine workings. *Coal*. 2022;6:32-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-32-34>. EDN: WJALGJ.

Информация об авторах / Information about the authors



Матвеева Ирина Викторовна,
кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель руководителя департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ matveeva.i.2010@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>
Irina V. Matveeva,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Head of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ matveeva.i.2010@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>



Бузов Сергей Анатольевич,
ведущий инженер департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
Sergey A. Buzov,
Leading Engineer of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
buzov.srg@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2771-315X>



Матвеев Олег Александрович,
ведущий инженер департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
matveev_oleg68@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>



Oleg A. Matveev,

Leading Engineer of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
matveev_oleg68@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>



Шигарова Татьяна Олеговна,

инженер департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
shigarova@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>

Tatiana O. Shigarova,

Engineer of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
shigarova@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>

Вклад авторов / Contribution of the authors

И.В. Матвеева – научное руководство, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

С.А. Бузов – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

О.А. Матвеев – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Т.О. Шигарова – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Irina V. Matveeva – supervision, investigation, writing – original draft, writing – editing.

Sergey A. Buzov – investigation, writing – original draft, writing – editing

Oleg A. Matveev – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Tatiana O. Shigarova – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена после рецензирования 10.09.2025; принята к публикации 23.09.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved after reviewing 10.09.2025; accepted for publication 23.09.2025.