

Анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторождения

О. С. Колесатова^{1,✉}, М. С. Колкова², Е. А. Горбатова², А. А. Зубков²

¹НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ okolesatova@mail.ru

Резюме. Представлены результаты комплексного исследования структурной неоднородности массива горных пород и кинематической устойчивости бортов карьера Юбилейного месторождения. Целью работы являлся количественный анализ пространственных характеристик трещин для оценки рисков нарушения устойчивости массива горных пород и прогноза проявления деформаций уступов. Исследование выполнено с применением современной дистанционной технологии: на участках северо-западного борта проведена фотограмметрическая съемка экшн-камерой GoPro Hero 11 Black. Обработка данных в программном комплексе Agisoft Metashape позволила построить детальные 3D-модели уступов с высоким разрешением (GSD 2,6–5,2 мм/пикс) и погрешностью не более 0,036 м. Статистический анализ измеренных элементов залегания трещин позволил выявить на участках три значимые системы трещин. Их наличие подтверждается высокими значениями параметра концентрации Фишера (κ_f от 39,8 до 271,1). Рассчитанные коэффициенты Вудкока позволили выделить два типа структурной неоднородности: упорядоченный «идеальный» блочный массив в окварцованных породах участка 1 ($K = 4,026$, $C = 2,718$) и слабо упорядоченный, разупрочненный массив в зонах глинистого изменения участка 2 ($K = 1,442$; $C = 2,121$). Установлена связь между типом неоднородности и механизмом потенциального разрушения. Для блочного массива характерен высокий риск проявления сдвиговых обрушений (вероятность плоскостного сдвига до 68,5 %, клинового – 38 %), а для разупрочненного преобладает риск опрокидывания (вероятность до 25 %). Полученные результаты подтверждают, что количественная оценка структурной неоднородности массива горных пород является важным фактором для прогнозирования деформаций уступов и обосновывает необходимость применения дифференцированного подхода к управлению устойчивостью бортов карьера. Для блочных массивов (при высоких значениях K , C) требуются меры против сдвига по плоскостям, для разупрочненных зон (при низких значениях K) – контроль опрокидывания и обводнения. Разработанный подход применим для прогноза устойчивости и повышения безопасности на данном и аналогичных месторождениях.

Ключевые слова: структурная неоднородность массива, трещиноватость, фотограмметрия, 3D-моделирование, параметр Фишера, коэффициенты Вудкока, кинематический анализ, устойчивость борта карьера, геомеханический риск

Для цитирования: Колесатова О.С., Колкова М.С., Горбатова Е.А. Зубков А.А. Анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 38-46. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46>.

Analysis of rock mass structural heterogeneity at the Yubileynoye deposit open-pit mine

O. S. Kolesatova^{1,3✉}, M.S. Kolkova², E. A. Gorbatova², A. A. Zubkov²

¹Non-State Educational Institution of Higher Education “Technical University of UMMC”,
Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, Magnitogorsk, Russian Federation

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”,
Yekaterinburg, Russian Federation
✉ okolesatova@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the structural heterogeneity of the rock mass and kinematic stability of the pit walls at the Yubileynoye deposit. The aim of the work was a quantitative analysis of the spatial characteristics of fractures to assess the risks of rock mass instability and predict the occurrence of bench deformations. The study was carried out using modern remote sensing technology: photogrammetric survey with a GoPro Hero 11 Black action camera was conducted on sections of the northwestern pit wall. Data processing in the Agisoft Metashape software package made it possible to construct detailed 3D models of the benches with high resolution (GSD 2.6–5.2 mm/pix) and an error of no more than 0.036 m. Statistical analysis of the measured fracture orientation elements revealed three significant fracture systems in the areas. Their presence is confirmed by high values of the Fisher concentration parameter (κ from 39.8 to 271.1). The calculated Woodcock coefficients made it possible to identify two types of structural heterogeneity: an ordered “ideal” blocky rock mass in silicified rocks of site 1 ($K = 4.026$, $C = 2.718$) and a weakly ordered, weakened rock mass in zones of clay alteration at site 2 ($K = 1.442$; $C = 2.121$). A relationship was established between the type of heterogeneity and the potential failure mechanism. The blocky rock mass is characterized by a high risk of shear failures (probability of planar sliding up to 68.5 %, wedge sliding – 38 %), while for the weakened rock mass, the risk of toppling predominates (probability up to 25 %). The obtained results confirm that quantitative assessment of the structural heterogeneity of the rock mass is an important factor for predicting bench deformations and substantiates the need for applying a differentiated approach to managing pit wall stability. For blocky rock masses (at high K , C values), measures against shear along planes are required; for weakened zones (at low K values), control of toppling and water ingress is necessary. The developed approach is applicable for stability prediction and safety enhancement at this and similar deposits.

Keywords: structural heterogeneity of rock mass, fracturing, photogrammetry, 3D modeling, Fisher parameter, Woodcock coefficients, kinematic analysis, pit wall stability, geomechanical risk

For citation: Kolesatova O.S., Kolkova M.S., Gorbatova E.A., Zubkov A.A. Analysis of rock mass structural heterogeneity at the Yubileynoye deposit open-pit mine. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 38-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46>.

Введение

Современные требования к безопасной и эффективной эксплуатации карьеров обуславливают необходимость детального изучения структурной неоднородности массива горных пород [1]. Особую актуальность приобретают методы, позволяющие оперативно и безопасно получать данные о трещиноватости на труднодоступных участках.

Традиционные методы картирования трещиноватости с использованием геологического компаса имеют существенные ограничения: высокую трудоемкость, низкую производительность и невозможность документирования труднодоступных участков, что сопряжено с повышенным риском для персонала [2–5].

Применение фотограмметрической съемки позволяет исключить эти ограничения и обеспечить: высокую оперативность съемки (в 3–5 раз быстрее контактных методов), детализацию данных, возможность интеграции с геоинформационными системами, безопасность проведения работ за счет исключения нахождения персонала в опасных зонах [6, 7].

Цель исследований: анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторожде-

ния с применением фотограмметрической съемки для оценки геомеханических рисков и прогноза устойчивости уступов.

Идея работы. Полученные результаты имеют важное значение для решения актуальных задач горного производства, включая прогноз устойчивости бортов карьеров, оптимизацию параметров систем разработки и повышение безопасности ведения горных работ [8, 9].

Материал и методы исследования

Для выполнения исследований использовался комплекс методов, включающий полевые съемочные работы и камеральную обработку данных.

На подготовительном этапе были выбраны характерные участки северо-западного борта карьера, отражающие различные структурно-литологические особенности массива: от интенсивно окварцованных пород до кор выветривания горных пород, включая глинистые образования. Проведение наземной фотограмметрической съемки осуществлялось с использованием экшн-камер GoPro Hero 11 Black, что позволило создать детальные 3D-модели уступов.

Обработка полученных данных выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. Точность ре-

конструкции контролировалась по величине общей ошибки репроекции, которая для всех моделей составила менее 0,85 пикселя. Среднее разрешение (GSD) итоговых 3D-моделей составило 2,5–3,5 мм на пиксель, что достаточно для идентификации трещин раскрытием от 2 мм.

Структурный анализ включал измерение элементов залегания трещин (азимут и угол падения) непосредственно по 3D-моделям, построение диаграмм Шмида для визуализации пространственной ориентировки трещин и выделение основных систем трещиноватости на основе кластерного анализа распределения полюсов трещин [10–13].

Количественная оценка параметров трещиноватости была проведена с расчетом параметра концентрации Фишера (κ_ϕ)

$$\kappa_\phi = (N - 1) / (N - |R|),$$

где N – количество полюсов;

R – величина результирующего вектора (т. е. величина векторной суммы всех полюсных векторов в наборе).

Интерпретация:

$k \rightarrow 0$ – равномерное распределение;

$k > 10$ – высокая концентрация;

$k > 50$ – очень высокая концентрация.

Для интегральной оценки структурных особенностей массива на каждом участке были определены параметры Вудкока [10].

Коэффициент K отражает распределение данных на диаграмме Шмида, его граничным состоянием является значение $K = 1$. При условии $K > 1$ данные, отраженные на диаграмме Шмида, характеризуются плоскостным распределением. При этом поверхность по своей форме будет стремиться к плоскости. Если значения $K < 1$, данные, отраженные на диаграмме Шмида, характеризуются распределением в виде пояса, поверхность имеет выпуклую (вогнутую) форму.

Коэффициент C показывает степень анизотропности поверхности. При $C = 0$ распределение данных, отраженных на диаграмме Шмида, имеет случайное распределение. Если $1 < C < 4$, поверхность обладает ярко выраженными анизотропными свойствами и, как следствие, имеет более высокую вероятность смещения по плоскости нарушения. При $C > 4$ поверхность будет иметь наиболее подвижные нарушения, поэтому при кинематическом анализе этой группы необходимо уделять особое внимание.

Морфометрический анализ трещин включает оценку раскрытия, а также выявление зон повышенной трещиноватости в местах пересечения различных систем.

На заключительном этапе была проведена комплексная интерпретация всех полученных данных. Выделенные системы трещин с высокими значениями концентрации Фишера ($\kappa_\phi > 10$) и массивы с коэффициентами Вудкока $K > 1$ и $C > 1$ рассматривались как зоны повышенного геомеханического риска, что послужило основой для последующего кинематического анализа устойчивости уступов.

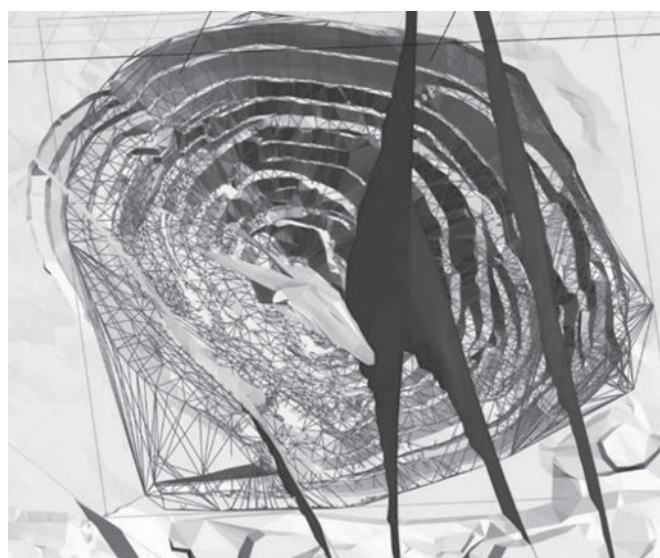
Результаты

Объект исследований

Месторождение Юбилейное локализовано в пределах баймак-бурибаевской вулканогенной свиты верхнего силура, представленной интенсивно трещиноватыми и метасо-

матически измененными породами – дацитами, андезитами, спилитами и базальтами. В разрезе четко выделяются два структурных этажа. Нижний этаж сложен вулканогенными образованиями с широким развитием процессов окварцевания, серицитизации и хлоритизации. Верхний этаж образован рыхлыми мезо-кайнозойскими отложениями, залегающими с угловым несогласием на подстилающих породах и представленными мощной толщей юрских песчано-глинистых пород и четвертичных суглинков, подстилаемых глинистой корой выветривания [14].

Ключевую роль в формировании структуры месторождения сыграли Бурибайский разлом и Макано-Петропавловская тектоническая зона, а само месторождение приурочено к узлу их сочленения. Бурибайский разлом имеет крутое восточное падение ($75\text{--}80^\circ$) и амплитуду смещения до 500–1000 м. Макано-Петропавловская зона представляет собой серию кулисообразных нарушений северо-западного простирания (рис. 1).



а (a)



б (b)

Рис. 1. Тектонические нарушения: а – расположение тектонических нарушений относительно карьера; б – фото участка с выходом разлома в северо-западном борту карьера /

Fig. 1. Tectonic faults: а – location of tectonic faults relative to the open-pit mine; б – photo of the site with fault outcrop in the northwestern pit wall

Проявленная на месторождении пострудная тектоника оказывает доминирующее влияние на устойчивость массива

ва горных пород. Она выражена системой крутопадающих нарушений субмеридионального простирания, представленных зонами расщепления и милонитовыми швами, и пологопадающими нарушениями с заполнением глиной трения. Массив характеризуется интенсивной мелкой трещиноватостью: модуль трещиноватости превышает 10 трещин на метр, а коэффициент раздробленности варьируется в пределах от 0 до 100 %, что свидетельствует о крайней неоднородности и нарушенности массива горных пород.

Геолого-структурные особенности массива в совокупности с контрастными физико-механическими свойствами комплексов горных пород обуславливают необходимость картирования структурных нарушений для оценки устойчивости уступов. Особое внимание уделялось картированию зон с интенсивной трещиноватостью и участков развития тектонических нарушений с глиной трения, представляющих наибольшую опасность для устойчивости бортов карьера.

Характеристика изучаемых объектов

Для фотограмметрической съемки были выбраны характерные участки северо-западного борта карьера.

Участок 1 сложен интенсивно трещиноватыми дацитами и андезитами. С зонами трещиноватости широко связаны процессы метасоматоза: окварцевание, гематитизация и сульфидизация в форме пирита. Наблюдаются дациты с прожилковым окварцеванием и пиритной минерализацией, дациты с интенсивной гематитизацией по магматическим минералам, а также андезиты, интенсивно замещенные кварцем.

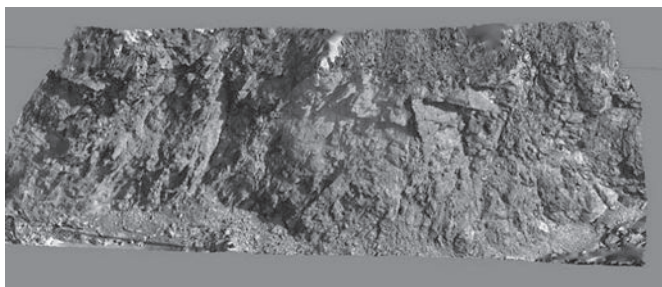
Участок 2 представлен дацитами и андезитами, преобразованными в условиях зеленосланцевого метаморфизма и выветривания. Для дацитов характерно широкое развитие хлорита, эпидота и актинолита, андезиты подвержены интенсивному выветриванию с полным замещением первичных минералов глинисто-гидрослюдистыми агрегатами. В отличие от первого участка наблюдаются процессы разрыхления и ослабления горных пород.

Изучаемые участки характеризуются хорошей обнаженностью и доступностью для дистанционной съемки. Высота уступов на исследуемых участках варьируется от 10 до 18 м, угол откоса – от 60° до 70°.

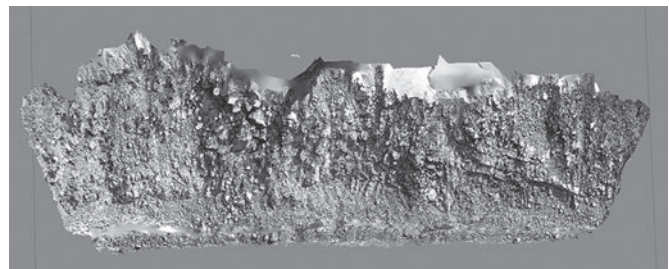
По результатам проведенной фотограмметрической съемки для каждого участка была построена детальная 3D-модель в программном комплексе Agisoft Metashape Professional (рис. 2) [15–17].

Полученные модели характеризуются высокой геометрической точностью и достоверно передают особенности строения горного массива.

На созданных 3D-моделях было проведено выделение всех видимых тектонических нарушений (трещин), имеющих открытые поверхности (рис. 3).

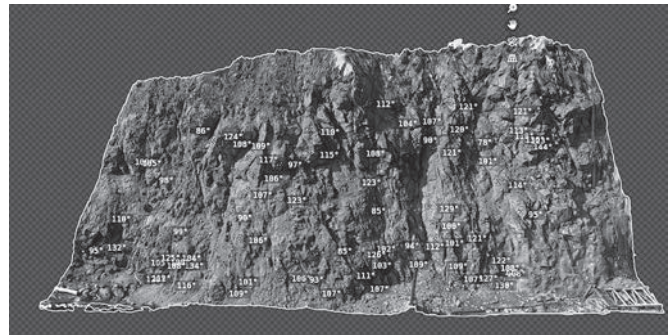


а (а)

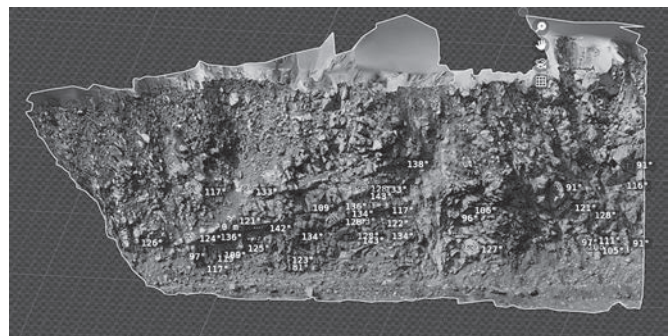


б (б)

Рис. 2. 3D-модели участков 1 (а) и 2 (б) /
Fig. 2. 3D-models of sites 1 (a) and 2 (b)



а (а)



б (б)

Рис. 3. Выделение трещин на участках 1 (а) и 2 (б) /
Fig. 3. Fracture identification at sites 1 (a) and 2 (b)

Анализ данных измерений элементов залегания трещин (азимут и угол падения) позволил выявить структурные особенности массива горных пород.

Участок 1. Пространственные характеристики трещин имеют дискретно-системное распределение полюсов (рис. 4а).

Статистическая обработка позволила выделить три преобладающие системы трещин со следующими пространственными характеристиками:

– **I система (ЮВ падение) трещин:** азимут простирания от 130 до 170° и угол падения от 60 до 87° при их средних значениях 165° и 54° соответственно;

– **II система (ЮЗ падение) трещин:** азимут простирания от 200 до 250° и угол падения от 10 до 35° при их средних значениях 228° и 33° соответственно;

– **III система (ЮВ падение) трещин:** азимут простирания от 140 до 160° и угол падения от 60 до 85° при их средних значениях 151° и 74° соответственно.

Выделенные системы трещин формируют трещинно-блоковую структуру. I и III системы трещин – крутопадающие, создают границы блоков, II система – пологая, обеспечивает

внутреннюю рассланцованность блоков. Взаимное пересечение систем создает зоны повышенной трещиноватости, определяя фильтрационные свойства и устойчивость массива.

Количественная оценка параметров трещиноватости (табл. 1) подтверждает и детализирует качественные наблюдения.

Таблица 1 / Table 1

Количественная оценка параметров трещиноватости участка 1 /
Quantitative assessment of fracturing parameters at site 1

Система трещин	Угол наклона	Азимут простирания	Параметр концентрации (критерий Фишера), κ_f	Надежность определения средних направлений (95 %)
I	50,5	166,9	138,8	2,7°
II	34,7	218,9	233,8	2,5°
III	64,0	149,8	271,1	2,7°

Установлено, что параметры концентрации Фишера значительно превышают пороговое значение $\kappa_f = 10$, что свидетельствует о статистической значимости этих систем. Можно предположить, что трещины формировались под воздействием однородных региональных тектонических напряжений. Надежность определения средних направлений этих систем достаточно высока, при вероятности 95 % отклонение не превышает 3°. Выделенные системы являются надежно установленными структурными элементами массива, и их параметры могут быть использованы для последующего геомеханического моделирования.

Плотностные характеристики трещиноватости показывают значительную неоднородность массива. Линейная плотность варьируется от 5 до 15 трещин на погонный метр. Преобладают трещины с раскрытием до 5 мм (75 % от общего количества), при этом 15 % трещин имеют раскрытие более 5 мм. Трещины выполнены раздробленной породой с глинистыми включениями. Поверхность трещин – шероховатая, реже – гладкая. Средняя длина трещин составляет 3–10 м, максимальные значения – до 15 м для систем I и III. Расстояние между трещинами изменяется от 6 до 20 см.

Для участка 2 пространственные характеристики трещин имеют дискретно-системный характер распределения полюсов (рис. 4б).

Выделены три основные системы, имеющие определенные геометрические параметры и, вероятно, различный генезис:

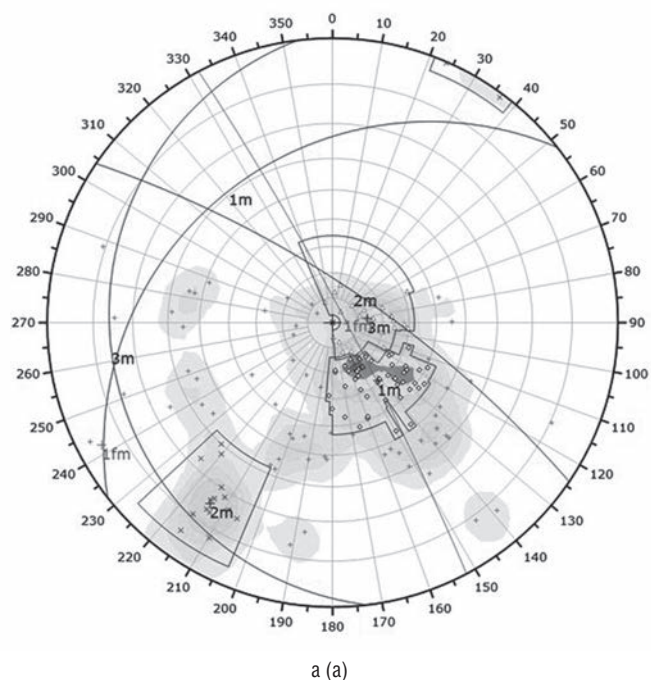
– IV система (ЮВ падение) трещин локализуется в центре диаграммы Шмита, характеризуется азимутом простирания от 130 до 170° и углом падения от 10 до 30° при их средних значениях 142° и 29° соответственно;

– V система (ЮЗ падение) трещин характеризуется азимутом простирания от 200 до 230° и углом падения от 70 до 85° при их средних значениях 214° и 75° соответственно;

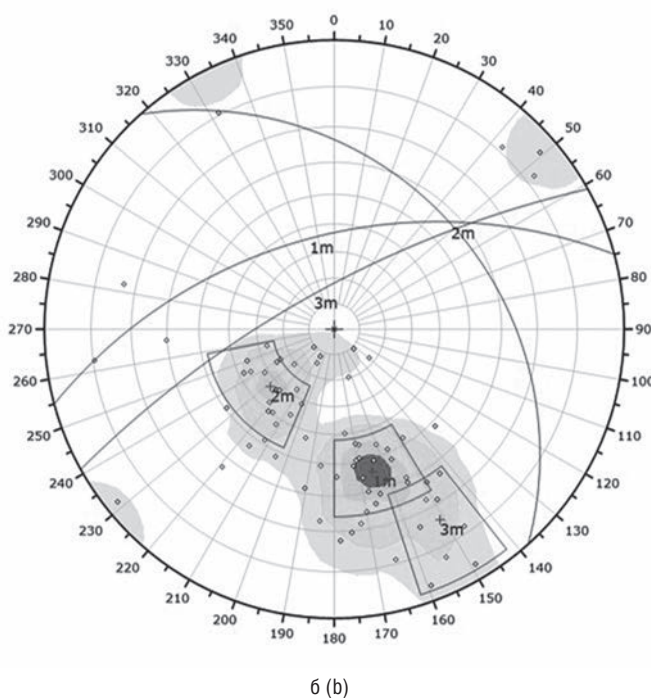
– VI система (В падение) трещин локализуется в центре диаграммы Шмита и характеризуется азимутом простирания от 60 до 110° и углом падения от 10 до 20° при их средних значениях 83° и 14° соответственно.

На участке 2 наблюдается увеличение плотности трещин в зонах пересечения различных систем. Крутопадающие трещины (система V) часто выполняют роль границ блоков, тогда как пологозалегающие (система IV) определяют внутреннюю рассланцованность этих блоков.

Анализ количественной оценки параметров трещиноватости подтверждает и детализирует качественные наблюдения. Результаты представлены в таблице 2.



а (a)



б (b)

Рис. 4. Системы трещин на участках 1 (а) и 2 (б) /
Fig. 4. Fracture systems at sites 1 (a) and 2 (b)

Высокие значения параметра концентрации Фишера κ_f от 39,8 до 64,1 для всех систем свидетельствуют об отсутствии случайного характера скопления трещин, а представляют собой устойчивые структурные элементы, сформированные региональными тектоническими напряжениями.

Надежность определения средних направлений этих систем высока, о чем говорят крайне малые их значения ~3,4–4,5° для 95 % вероятности.

Таблица 2 / Table 2

**Количественная оценка параметров трещиноватости участка 2 /
Quantitative assessment of fracturing parameters at site 2**

Система трещин	Угол наклона	Азимут простирания	Параметр концентрации (критерий Фишера), κ_{ϕ}	Надежность определения средних направлений (95%)
IV	29,23	142,45	39,8	3,4°
V	75,44	213,85	64,1	4,4°
VI	14,06	83,16	46,2	4,0°

Таким образом, количественные данные не только подтверждают структурную модель участка, но и позволяют оценить вклад каждой системы в общую нарушенность массива, что крайне важно для дальнейшей оценки его устойчивости.

Плотностные характеристики трещиноватости показывают значительную неоднородность участка. Линейная плотность варьируется от 8 до 15 трещин на погонный метр. Преобладают трещины с раскрытием более 5 мм. Поверхность трещин – шероховатая, реже – гладкая. Трещины выполнены раздробленной хлоритизированной породой. Средняя длина трещин составляет 10–20 м. Расстояния между трещинами изменяются от 6 до 20 см.

На основе комплексного анализа установлено, что массивы горных пород обоих участков характеризуются четко выраженной трещинно-блоковой структурой, сформированной тремя статистически значимыми системами трещин. Высокие значения параметра концентрации Фишера свидетельствуют о формировании этих систем под воздействием устойчивых региональных тектонических напряжений. Исключительно высокая надежность определения средних направлений подтверждает достоверность выделенных структурных неоднородностей (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Параметры систем трещин /
Parameters of fracture systems**

Номер участка	Система трещин	Параметр	Значение	Интенсивность трещиноватости, 1/м	Блочность массива
Участок 1	I	Азимут падения, °	165	5–15	Мелкая
		Угол падения, °	54		
	II	Азимут падения, °	228		
		Угол падения, °	33		
	III	Азимут падения, °	151		
		Угол падения, °	74		
Участок 2	IV	Азимут падения, °	142	8–15	От мелкой до средней
		Угол падения, °	29		
	V	Азимут падения, °	214		
		Угол падения, °	75		
	VI	Азимут падения, °	83		
		Угол падения, °	14		

Анализ полученных результатов демонстрирует формирование на исследуемых участках системы трещин с выраженной пространственной ориентацией. Для уточненной оценки состояния блокового массива и определения степени

влияния тектонических нарушений применяют коэффициенты Вудкока (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Результаты анализа значений векторов поверхностей участков /
Results of analysis of surface vector values at the sites**

Номер участка	s1	s2	s3	K	C
1	0,848	0,096	0,056	4,026	2,718
2	0,711	0,203	0,085	1,442	2,121

На участке 1 процессы окварцевания и гематитизации привели к «цементации» и укреплению стенок трещин, сохранив при этом их морфологическую и пространственную четкость. Это проявилось в высоких значениях параметра концентрации Фишера ($\kappa_{\phi} > 138$) и сформировало блочную структуру с максимальными значениями коэффициента Вудкока K (4,026). Высокое значение C (2,718) подтверждает, что анизотропия массива горных пород выражена и контролируется небольшим количеством доминирующих систем трещин. Таким образом, на этом участке трещины выполняют роль четких структурных границ, разделяющих относительно прочные блоки.

На участке 2 преобладание процессов хлоритизации, эпидотизации и выветривания привело к принципиально иному результату. Метасоматические минералы и глинистые агрегаты заполнили и «размазали» первичные трещинные поверхности, преобразуя нарушения в системы трещин. Это выразилось в более низких значениях параметра Фишера ($\kappa_{\phi} = 39,8–64,1$) и коэффициента K (1,442). При этом сохранение анизотропии (C = 2,121) свидетельствует о том, что общая ориентировка систем трещин связана с первичной тектонической структурой.

Ключевым практическим следствием данного структурного районирования является прямая связь типа неоднородности с прогнозируемым механизмом разрушения. Упорядоченный блочный массив участка 1 предопределяет высокий риск структурно-контролируемых обрушений (плоскостной и клиновой сдвиг). Слабо упорядоченный, но разупрочненный массив участка 2 создает предпосылки для деформаций смешанного типа, включая опрокидывание и потенциальное сползание по ослабленным зонам, заполненным глинистым материалом.

Обсуждение результатов

По особенностям пространственных взаимоотношений поверхностей ослаблений и элементов откоса выделяют возможные типы нарушения устойчивости: сдвиг по плоскости (Planar Sliding), сдвиг клина (Wedge) и опрокидывание двух видов: прямое (Direct Toppling) и с изгибом (Flexural Toppling). Определение вероятности реализации механизмов производится при помощи кинематического анализа по стереограммам трещиноватости [18–21].

Для анализа устойчивости уступов использовались данные по двум характерным участкам. Первый участок имеет следующие геометрические параметры: азимут падения – 230°, угол падения – 60° и высоту уступа – 20 м. Второй участок характеризуется азимутом падения – 252°, таким же углом падения в 60° и высотой уступа, равной 12 м.

Результаты кинематического анализа (табл. 5) наглядно подтверждают и детализируют выводы, сделанные на этапе структурного анализа, и напрямую связывают их с конкретными рисками.

Таблица 5 / Table 5

**Результаты кинематического анализа вероятностных схем
обрушения откосов карьера /
Results of kinematic analysis of probabilistic failure schemes of open-
pit slopes**

Участок	Схема деформирования уступа	% критических пересечений	Залегание систем трещин, вызывающих обрушения (азимут падения / угол падения)	
1	Planar Sliding	50	228 / 33	
	Wedge Sliding	38	165 / 54	151 / 71
	Direct Toppling	25	228 / 33	95 / 39
2	Planar Sliding	4	142 / 29	
	Wedge Sliding	8	214 / 75	142 / 29
	Direct Toppling	15	142 / 29	

Кинематический анализ участка 1, характеризующегося выраженной упорядоченной блочной структурой (коэффициент Вудкока $K = 4,026$), демонстрирует, что потенциальные механизмы деформации детерминированы геометрией систем трещин. Для участка 1 выявлен риск плоскостного сдвига (5 %), образованный пологой системой трещин (II – $228 / 33^\circ$) указывающий на возможность обрушения. Такой механизм характеризуется смещением значительного блока породы вдоль протяженной, непрерывной плоскости ослабления. Риск клинового сдвига (38 %), формируемого пересечением систем I и III, подтверждает, что массив расчленен на систему полиэдрических блоков, устойчивость которых зависит от сцепления в линии их пересечения. Совокупность этих факторов, а также высокие значения параметра концентрации Фишера ($\kappa_\phi > 138$) и коэффициента анизотропии C (2,718) позволяют классифицировать участок 1 как зону потенциально неустойчивого блочного массива.

Для участка 2, характеризующегося низкой степенью структурной упорядоченности ($K = 1,442$), кинематический анализ демонстрирует иную модель механизмов разрушения. Низкие вероятности сдвиговых механизмов (плоскостной – 4 %, клиновой – 8 %) при относительном преобладании риска прямого опрокидывания (15 %). Данный механизм, формируемый крутопадающими трещинами системы II ($214/75^\circ$), характерен для прогрессирующего, часто ползучего разрушения, зарождающегося в нижней части уступа. Это согласуется с литолого-петрографическими данными: процессы выветривания и хлоритизации преобразовали трещины в распределенные зоны ослабления. Такое изменение структурной геометрии массива снижает вероятность мгновенного сдвига по четким плоскостям, но создает предпосылки для длительных деформаций опрокидывания, что требует иных подходов к мониторингу.

Кинематический анализ оценивает возможность обрушения, но не учитывает напряженное состояние, прочность по трещинам и гидродинамическое давление. Высокая вероятность на участке 1 указывает на критическую необходимость следующего этапа – детального геомеханического моделирования с назначением прочностных свойств выделенным системам трещин (с, ф) и оценкой коэффициента запаса устойчивости.

Выявленные зоны пересечения систем трещин, особенно на участке 1, являются потенциальными источниками клинового сдвига и каналами повышенной водопроницаемости. Обводнение этих зон может резко снизить напряжение на контактах и привести к переходу от потенциально неустойчивого состояния к активному.

Полученные результаты обосновывают необходимость применения дифференцированной системы мониторинга:

– для участка 1 приоритетным является мониторинг смещений по конкретным кинематически выделенным плоскостям (система II);

– для участка 2 акцент должен быть сделан на мониторинг деформаций верхней бровки и поверхности откоса, например, с помощью систем наземного радарного мониторинга или повторной фотограмметрической съемки.

Проведенный комплексный анализ, включающий структурное картирование и кинематическую оценку, позволил не только выявить риски нарушения устойчивости, но и установить их закономерности и причины. Это создает основу для разработки обоснованных и экономически эффективных мероприятий по обеспечению устойчивости бортов карьера месторождения Юбилейное.

Заключение

В результате проведенного исследования была выполнена комплексная оценка структурной нарушенности массива горных пород бортов карьера Юбилейного месторождения. Эффективность примененной комплексной оценки, основанной на совместном использовании наземной фотограмметрии, статистического и кинематического анализов, получила практическое подтверждение.

Работа позволила сформулировать следующие основные выводы:

1. Апробирована и верифицирована методика дистанционного картирования. Применение экшн-камеры GoPro Hero 11 Black и обработка данных в Agisoft Metashape позволили создать детализированные (GSD 2,5–3,5 мм/пикс.) 3D-модели обнажений. Сравнение с традиционными контактными измерениями показало расхождение в определении элементов залегания трещин не более 5° , что подтверждает достоверность метода при его высокой оперативности (в 3–5 раз) и безопасности.

2. Установлены закономерности пространственного распределения трещиноватости и выявлена их связь с условиями формирования структурных нарушений. На двух участках выделены три статистически значимые системы трещин. Высокие значения параметра концентрации Фишера ($\kappa_\phi > 39$ для всех систем) однозначно указывают на их формирование под влиянием устойчивых региональных тектонических напряжений, связанных с Бурибайским разломом и Макано-Петропавловской зоной.

3. Выполнена количественная классификация массивов на основе параметров Вудкока, выявившая прямое влияние типа постминеральных изменений:

– участок 1 (окварцованные породы) характеризуется упорядоченной «идеальной» блочной структурой ($K = 4,026$) с выраженной анизотропией ($C = 2,718$), где трещины играют роль границ между блоками;

– участок 2 (глинисто-хлоритовое изменение) обладает слабо упорядоченной, но разупрочненной структурой ($K = 1,442$, $C = 2,121$), где первичные трещины преобразованы в зоны ослабления.

Полученные различия в характеристиках массивов доказывают, что структурные особенности массива сформированы не только тектоническими процессами, но и последующими метасоматическими преобразованиями и гипергенным выветриванием.

4. Выполнен количественный прогноз рисков, связанный с установленными типами структур.

Кинематический анализ установил связь между коэффициентами Вудкока и вероятностью механизмов разрушения:

– для участка 1 доминируют риски крупномасштабных, структурно-детерминированных обрушений: плоскостной сдвиг (50 %) по системе II и клиновой сдвиг (38 %);

– для участка 2 преобладает риск постепенного, прогрессирующего разрушения в форме прямого опрокидывания (15 %).

5. Предложены рекомендации по обеспечению безопасности ведения горных работ. Результаты исследований показывают, что применение единых подходов ко всему объекту исследования неэффективно.

Для предотвращения потери устойчивости уступов необходимо:

– провести структурное районирование бортов карьера на основе количественных критериев, таких как коэффициенты Вудкока (К, С) и параметр концентрации Фишера (κ_ϕ). Это позволит выделить зоны с различными типами структурной неоднородности;

– внедрить дифференцированную систему мониторинга, ко-

торая для массивов с упорядоченной блочной структурой должна быть направлена на обнаружение смещений по выделенным опасным плоскостям, а для зон с разупрочненным массивом – на измерение общих деформаций поверхности откоса.

Выводы

1. Настоящее исследование подтверждает эффективность комплексного подхода, основанного на дистанционном 3D-моделировании и структурно-кинематическом анализе, для оценки устойчивости бортов карьера. Практическим результатом является доказанная необходимость дифференцированного управления рисками: для упорядоченных блочных массивов (высокие К и С) ключевыми являются меры против сдвига по конкретным плоскостям, а для разупрочненных зон (низкий К) – контроль опрокидывания и обводнения.

2. Разработанная методика и сделанные выводы служат основой для повышения безопасности горных работ на Юбилейном месторождении и могут быть применены на других объектах со сложной геологической структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. Москва, 2022: 102.
Methodological guidelines for studying rock mass to ensure the stability of open-pit walls, benches and dump slopes. Moscow, 2022: 102. (In Russ.).
2. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. Москва, 1970: 160.
Rats M.V., Chernyshev S.N. Fracturing and properties of fractured rocks. Moscow, 1970: 160. (In Russ.).
3. Латышев О.Г., Прищепа Д.В., Франц В.В. Статистическое моделирование природных трещин. *Известия вузов. Горный журнал*. 2016; 5: 38-45.
Latyshev O.G., Prishchepa D.V., Frants V.V. Statistical modeling of natural fractures. *Universities News. Mining Journal*. 2016; (5): 38-45. (In Russ.).
4. Протодяконов М.М. Методы оценки трещиноватости и прочности горных пород в массиве. Москва, 1964: 32.
Protodyakonov M.M. Methods for assessing fracturing and strength of rocks in the massif. Moscow, 1964: 32. (In Russ.).
5. Серебряков Е.В., Гладков А.С., Гапфаров Т.Д. Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 160-177. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160.
Serebryakov E.V., Gladkov A.S., Gaptarov T.D. Review of modern data collection methods for assessing structural disturbance of rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; (9): 160-177. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160.
6. Ливинский И.С., Митрофанов А.Ф., Макаров А.Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность. *Горный журнал*. 2017; 8: 51-55.
Livinsky I.S., Mitrofanov A.F., Makarov A.B. Integrated geomechanical modeling: structure, geology, reasonable sufficiency *Mining Journal*. 2017; (8): 51-55. (In Russ.).
7. Herrero M.J. Pérez-Fortesb A.P., Escayv J.I., et al. 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization. *Computers & Geosciences*. 2022; 163: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105121>.
8. Колесатова О.С., Романько Е.А., Григорьева Н.Ю. и др. Оценка устойчивости бортов карьера с учетом структурных особенностей при- бортового массива пород (на примере Камаганского колчеданного месторождения). *Современные технологии и развитие политехнического образования: научное электронное издание*. Владивосток, 2016: 215-219.
Kolesatova O.S., Romanko E.A., Grigorieva N.Yu., et al. Assessment of open-pit wall stability considering structural features of the near-wall rock mass (on the example of the Kamagan copper-pyrite deposit). *Modern Technologies and Development of Polytechnic Education: Scientific Electronic Publication*. Vladivostok, 2016: 215-219. (In Russ.).
9. Редькин Г.М. Показатели структурной раздробленности массивов горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009; 12: 219-225.
Redkin G.M. Indicators of structural fragmentation of rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009; (12): 219-225. (In Russ.).
10. Сергунин М.П., Еременко В.А. Обработка структурных геологических моделей алгоритмами искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 2-13. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_2.
Sergunin M.P., Eremenko V.A. Processing of structural geological models by artificial intelligence algorithms. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; (9): 2-13. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_2.
11. Дэвис Д.С. Статистический анализ данных в геологии. Москва, 1990: 319.
Davis D.S. Statistical analysis of data in geology. Moscow, 1990: 319. (In Russ.).
12. Caumon G., Gray G., Antoine C., et al. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: Theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013; 3 (51): 1613-1621. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2207727>.
13. Battulwar R., Zare-Naghadhehi M., Emami E., et al. A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13 (4): 920-936. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>.
14. Аллабердин А.Б., Валеев А.С., Зубков А.А. Анализ горно-геологических условий залегания медноколчеданных месторождений. *Успехи современного естествознания*. 2021; 4: 44-51.
Allaberdin A.B., Valeev A.S., Zubkov A.A. Analysis of mining-geological conditions of copper-pyrite deposits. *Advances in Current Natural Sciences*. 2021; (4): 44-51. (In Russ.).

15. Борзенко Г.Б., Николаев А.Ю. Современные методы оптимизации DFN моделей при комплексировании геолого-геофизических данных. *Экспозиция Нефть Газ*. 2025; 1: 36-43. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2025-1-36-43>.
Borzenko G.B., Nikolaev A.Yu. Modern methods of DFN models optimization when integrating geological and geophysical data. *Exposition Oil & Gas*. 2025; (1): 36-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2025-1-36-43>.
16. Li A., Li Y., Wu F., et al. Simulation method and application of three-dimensional DFN for rock mass based on Monte-Carlo technique. *Applied Sciences*. 2022; 12 (22): 1-12. <https://doi.org/10.3390/app122211385>.
17. Herrero M.J., Pérez-Fortesb A.P., Escavy J.I., et al. 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization. *Computers & Geosciences*. 2022; 163: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105121>.
18. Колесатова О.С. Особенности структурного строения горного массива месторождения Камаган. *Рациональное природопользование: сборник научных трудов*. Магнитогорск, 2014: 20-24.
Kolesatova O.S. Features of the structural structure of the rock mass at the Kamagan deposit. *Rational Nature Management: Collection of Scientific Papers*. Magnitogorsk, 2014: 20-24. (In Russ.).
19. Корчак С.А., Абатурова И.В., Савинцев И.А. и др. Оценка состояния массива горных пород для выделения потенциально опасных участков проектируемого карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 9: 87-98. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_87.
Korchak S.A., Abaturova I.V., Savintsev I.A., Storozhenko L.A. Assessment of rock mass condition for identification of potentially hazardous areas in a designed open-pit mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022; (9): 87-98. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_87.
20. Колесатова О.С., Горбатова Е.А. Оценка возможности проявления деформаций с позиции нарушенности массива (на примере месторождения Камаган). *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020; 4 (60): 173-182. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-173-182>.
Kolesatova O.S., Gorbatoeva E.A. Assessment of the possibility of deformations from the perspective of massif disturbance (on the example of the Kamagan deposit). *News of the Ural State Mining University*. 2020; 4 (60): 173-182. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-173-182>.
21. Игнатенко И.М., Яницкий Е.Б., Дунаев В.А. и др. Трещиноватость породного массива в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». *Горный журнал*. 2019; 10: 11-15. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.01>.
Ignatenko I.M., Yanitsky E.B., Dunaev V.A., et al. Fracturing of the rock mass in the open pit of the Zhelezny mine of JSC Kovdorsky GOK. *Mining Journal*. 2019; (10): 11-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.01>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оксана Сергеевна Колесатова –

доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9307-9779>; e-mail: okolesatova@mail.ru

Мария Сергеевна Колкова –

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

Елена Александровна Горбатова –

доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

Антон Анатольевич Зубков –

доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.02.2026

Поступила после рецензирования: 26.03.2026

Принята к публикации: 04.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Oksana S. Kolesatova –

Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9307-9779>; e-mail: okolesatova@mail.ru

Maria S. Kolkova –

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor of the Department of Geology, Surveying and Mineral Processing, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5667-1629>

Elena A. Gorbatoeva –

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Professor of the Department of Surveying and Mineral Processing Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

Anton A. Zubkov –

Dr. Sci. (Technical), Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 17.02.2026

Revised: 26.03.2026

Accepted: 04.04.2026