Оценка возможности проявления деформаций с позиции нарушенности массива (на примере месторождения Камаган)

Оксана Сергеевна КОЛЕСАТОВА^{1,2*},
Елена Александровна ГОРБАТОВА^{3**}

¹Технический университет УГМК, Верхняя Пышма, Свердловская область, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Москва, Россия

Аннотация

Введение. Основной задачей при отработке месторождений полезных ископаемых открытым и открыто-подземным способами является обеспечение безопасности ведения горных работ. В результате длительного стояния бортов карьера в прибортовом массиве происходят изменения природных напряжений, которые приводят к возникновению деформаций. Прогноз и предотвращение деформационных процессов прибортового массива во многом зависят от достоверной информации о его структурных особенностях, включая строение массива и степень его нарушенности.

Цель исследований – оценка возможности проявления деформаций с позиции нарушенности массива.

Методы проведения исследований. При оценке возможности проявления деформаций использовался комплекс методов, включающий: натурные замеры трещиноватости; методы математической статистики с использованием программы Stereonet для обработки результатов замеров; анализ пространственного положения трещин относительно направления простирания откосов и бортов карьера с выявлением наиболее опасных; кинематический анализ, позволяющий определить потенциальные виды потери устойчивости с позиции нарушенности массива.

Результат исследований. На юго-восточном, северном и западном бортах карьера месторождения Камаган выделена 41 система трещин, из них преобладающими являются системы северо-западного падения под углами 50°–85°; юго-восточного – под углом 50° и юго-западного – под углом 50°. На примере северного борта ($A_{np} = 90^\circ$; $n = 60^\circ$) установлено, что потенциальными видами потери устойчивости являются сдвиг клиновидного блока (Wedge), образованный системами трещин с пространственными характеристиками $A_{np} = 65^\circ$; $n = 45^\circ$ и $A_{np} = 150^\circ$; $n = 90^\circ$, и сдвиг призматического блока (Planar sliding), сформированный системами трещин с параметрами $A_{np} = 90^\circ$; $n = 55^\circ$ и $A_{np} = 100^\circ$; $n = 42^\circ$.

Выводы. Исследованиями доказана необходимость изучения и выявления в процессе отработки поверхностей ослабления и определения параметров их залегания с целью оценки возможности проявления деформаций и дальнейшей оценки устойчивости откосов.

Ключевые слова: деформации, системы трещин, кинематический анализ, нарушенность массива, потеря устойчивости борта карьера, диаграммы трещиноватости.

Введение

В процессе разработки месторождений полезных ископаемых открытой и комбинированной геотехнологиями проявляется изменение геомеханического состояния горного массива, сопровождающееся перераспределением напряжений и осложнением горно-геологической ситуации карьерного поля и, как следствие, развитием деформационных процессов. Последние наносят большой ущерб и приводят к изменению режима работы горного предприятия и к дополнительным материальным затратам на предупредительные меры и их ликвидацию [1].

Под деформациями горного массива следует понимать процесс его разрушения под действием природных (гидрогеологических условий, физико-механических свойств вмещающих пород и руд, структурно-тектонических особенностей прибортовых массивов) и

горнотехнических (технологии ведения горных работ при разработке месторождения) факторов. К основным видам деформаций откосов на карьерах относятся оползни (43 %), обрушения (21 %), осыпи (15 %), оплывины и просадки (21 %) [2, 3]. Из них 75 % деформаций происходит в слабых песчано-глинистых, а 25 % – в скальных и полускальных выветренных и трещиноватых породах.

Интенсивность деформационных процессов увеличивается с ростом глубины карьера. Исследованиями установлено, что проявление деформаций при отработке месторождения карьером глубиной до 100 м наблюдается лишь в 50 %. При переходе на большие глубины отработки вероятность возникновения деформационных процессов составляет около 80 %, что обусловлено горнотехническими условиями отработки [2]. Так, на

✉ okolesatova@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-9307-9779>

** lena_gorbatova@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

Таблица 1. Виды деформаций и их причины.
Table 1. Types of deformities and their causes.

Месторождение	Способ отработки месторождения	Деформации	Причины их возникновения
Западно-Озерное	Открытый, глубина карьера 160 м	Оползни	Гидрогеологические условия, трещиноватость, БВР
Юбилейное	Открыто-подземный, глубина карьера 330 м	Оползни, осыпания, вывалы	Геологические особенности строения месторождения, гидрогеологические условия, БВР, подземные горные работы
Камаган	Открыто-подземный, глубина карьера 150 м	Оползни, обрушения	Геологические особенности строения месторождения, гидрогеологические условия, трещиноватость, БВР, подземные горные работы
Осеннее	Открытый, глубина карьера 200 м	Осыпи, оползни	Слоистое строение массива с падением контактов слоев в сторону выемки
Джусинское	Открыто-подземный, глубина карьера 250 м	Оползни, осыпания	Гидрогеологические условия, трещиноватость, БВР
Сибайское	Открыто-подземный, глубина карьера 530 м	Оползни, просадки	Интенсивная раздробленность и трещиноватость горных пород, подземные горные работы
Учалинское	Открыто-подземный, глубина карьера 340 м	Оползни, осыпания	Гидрогеологические условия, трещиноватость, подземные горные работы

медноколчеданных месторождениях Южного Урала, осваиваемых открытой или комбинированной геотехнологиями, четко прослеживается наличие деформационных процессов на всех месторождениях при глубине карьера более 100 м (табл. 1).

Одним из определяющих условий проявления деформационных процессов является структурная нарушенность массива горных пород, обусловленная его геологическими характеристиками (литолого-петрографическим составом, строением геологического разреза и тектоникой) с последующим их изменением в процессе ведения горных работ [4]. К основным показателям структурной нарушенности относят количество трещин, их пространственные и геометрические параметры, интенсивность трещиноватости, характер контакта стенок трещин, наличие выполняющего материала (минералов, горных пород) полости трещин [5, 6]. Поэтому изучение трещиноватости горного массива и контроль ее изменения в период эксплуатации месторождения с позиции оценки возможных проявлений деформационных процессов является весьма актуальным.

Объект исследования

Месторождение Камаган расположено на востоке Республики Башкортостан, на западной окраине города Сибай. Месторождение находится в Сибайском рудном районе и локализуется в одноименной горст-антиклинали. В строении месторождения выделяют два структурных этажа, нижний этаж представлен вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями карамалыташской свиты среднего девона, верхний этаж – глинистыми и глинисто-щебнистыми осадочными породами триаса и четвертичными элювиально-делювиальными и

аллювиально-пролювиальными отложениями. Породы верхнего структурного этажа залегают несогласно на подстилающих отложениях. На Камаганском месторождении выделено 12 рудных тел, залегающих в вулканогенных породах кислого состава в интервале глубин от 90 до 230 м. Вмещающие породы преобразованы в метасоматиты [7, 8].

К основным тектоническим нарушениям со смещением на месторождении относится Восточно-Сибайский разлом. Плоскость разлома проходит в 200–300 м восточнее восточного борта карьера, оперяющие его разрывы, оказывают ослабляющее действие на массив коренных пород, и сопровождаются мощной зоной раздробленных и рассланцованных горных пород. Субширотные разрывы фиксируются в северном и юго-восточном бортах карьера. Они обводнены. Падают разрывы к северо-западу по азимуту 320° под углами 55° (северный) и 43° (южный). На участках их подсечений скважинами породы интенсивно поддроблены, отмечаются трещины с милонитом, рассланцевание. Массив нарушен многочисленными маломощными тектоническими нарушениями и имеет сложное блоковое или мозаичное строение [9].

Запасы месторождения обрабатывают комбинированной открыто-подземной геотехнологией. В период с 1999 по 2010 г. разработка велась открытым способом. Параметры карьера на момент постановки его в предельное положение: глубина карьера – 150 м, размеры карьера (длина/ширина) по поверхности 640/530 м и по дну карьера 160/30 м, результирующий угол борта карьера 60°. В настоящее время отработка месторождения ведется подземным способом. Вскрытие осуществлено четырьмя штольнями из бортов карьера и квершлагом от ствола «Северный Вентиляционный» Сибайского подземного рудника.

Рисунок 1. Системы трещин на карьере: I-IV – системы трещин, 1-5 – процент от общего числа замеров (1-1; 2-4; 3-3; 4-4; 5-10; 6-10 и более).

Figure 1. Crack systems at the quarry: I-IV –crack systems, 1-5 – percent of the total number of measurements (1-1; 2-4; 3-3; 4-4; 5-10; 6-10 and more).

Прибортовой массив карьера Камаганского месторождения находится в неустойчивом состоянии, наиболее сложными условиями отличаются его северный и юго-восточный борты.

Методы исследования

Изучение нарушенности горного массива месторождения Камаган проводилось путем непосредственных замеров трещин в натурных условиях на борту карьера между штольнями гор. 125 и гор. 140. На данном участке были выделены 3 сектора: юго-восточный, северный, западный борты. Выбор участка замера обусловлен геологическими особенностями горного массива и горнотехническими условиями отработки месторождения. Замеры трещиноватости включали определение пространственных (угла и азимута падения плоскости) и геометрических (длины и ширины) параметров трещин, а также интенсивности трещиноватости. Параллельно производился отбор проб для детальной идентификации горных пород с учетом интенсивности их изменения и установления значений физико-механических свойств.

Полученные характеристики трещиноватости обрабатывались и анализировались с помощью программного продукта Stereonet с построением диаграмм трещиноватости и выделением систем трещин согласно условиям параллельности и представительности. Производился анализ пространственного положения трещин относительно направления простирания откосов и бортов карьера по классификации И. И. Попова [6, 10] с выявлением наиболее опасных.

Для выявления потенциальных видов потерь устойчивости с позиции нарушенности массива применялся

кинематический анализ, базирующийся на использовании стереографических проекций [11, 12, 13].

Результат исследований

Оценка нарушенности горного массива осуществлялась в дацитовых, базальтовых, андезитовых, андезит-дацитовых и андезит-базальтовых порфиритах. По результатам замеров выделена 41 система трещин (табл. 2).

По пространственным характеристикам систем трещин выделяют два типа расположения полюсов – поясовое и центральное (рис. 1). Для поясового распределения типичны углы падения плоскости трещин, равные 20°–40° при азимутах простирания 0°–180° и 270°–330°. Среднее расстояние между трещинами составляет 0,10–0,30 м. Большинство полюсов трещин расположено в центре диаграммы. Трещины имеют крутые углы падения (75°–90°) при азимутах простирания 0°–360°. Расстояние между трещинами колеблется от нескольких миллиметров до нескольких метров, интенсивность трещиноватости изменяется от 0,05 до 3.

Анализ показал, что в карьере преобладают несколько систем трещин, выделенных по диаграмме трещиноватости, со следующими пространственными характеристиками: преимущественно северо-западного падения под углом 50°–85°; юго-восточного – под углами 50° и юго-западного – под углом 50° (рис. 1). Трещины чаще всего скрытые, их полости выполнены кальцитом в базальтах и кварцем в дацитовых порфиритах [9].

Влияние трещиноватости на устойчивость откосов и бортов карьера оценивалось на примере северного борта в связи со сложной его геомеханической ситуацией.

Оценка возможности проявления деформаций

Таблица 2. Характеристика основных систем трещин.

Table 2. Characteristics of the main crack systems.

Борт	Система трещин	Элементы залегания, град.		Расстояние между трещинами, м	Характеристика трещин	Горные породы
		A _{пр}	v			
ЮВ–СВ борт	I	268	66	От 0,50 до 1	Система параллельных трещин. Трещины открытого типа	Дацитовые порфириты
	II	253	70	От 0,01 до 0,05	Серия открытых параллельных трещин от 20 до 40 см	Дацитовые порфириты
	III	180	90			
	IV	266	70			
	V	235	64	От 0,12 до 0,50	Серия параллельных трещин	Дацитовые порфириты
	VI	5	45	От 0,07 до 0,30		
	VII	175	32	От 0,50 до 1		
	VIII	30	45	От 0,01 до 0,10	Трещины закрытого типа, по стенкам наблюдается кварц-карбонатное вещество	Дацитовые порфириты
	IX	240	75	От 0,04 до 0,10		
	X	165	82	От 0,60 до 1,0	Трещины закрытого типа	Дацитовые порфириты
	XI	130	30	От 0,50 до 1,0		
	XII	330	74	От 0,10 до 0,40		
	XIII	55	70			
	XIV	325	22		От 0,07 до 0,15	Трещины открытого и закрытого типа
	XV	25	90	0,50	Единичные трещины открытого типа	
	XVI	0	65	От 0,01 до 0,05	Трещины открытого и закрытого типа	Дацитовые порфириты
Северный борт	XVII (1)	30	10	От 0,01 до 0,30	Трещины закрытого типа	Дацитовые порфириты
	XVIII (2)	255	50	От 0,02 до 0,10		
	XIX (3)	85	70	От 0,1 до 0,7	Трещины открытого и закрытого типа, стенки ожелезненные	Дацитовые порфириты
	XX (4)	300	55			
	XXI (5)	268	10			
	XXII (6)	65	45	От 0,05 до 0,20	Трещины закрытого типа	Дацитовые порфириты
	XXIII (7)	255	80			
	XXIV (8)	274	90	От 0,1 до 0,15	Трещины открытого и закрытого типа. По стенкам кварц-карбонатное вещество	Дацитовые порфириты
	XXV (9)	260	50	От 1,0 до 2,0	Трещины открытого типа	
	XXVI (10)	90	55	От 0,1 до 0,5		
	XXVII (11)	100	42	От 0,1 до 0,4		
	XXVIII (12)	150	90	От 0,05 до 0,20		
	XXIX (13)	250	85	от 0,1 до 1,5	Трещины открытого типа. По стенкам кварц-карбонатное вещество	
СЗ–ЮЗ борт	XXX	330	90	От 1,0 до 5,0	Трещины открытого типа, раскрытие до 5 см	Андезит-базальтовые порфириты
	XXXI	150	90		Трещины открытого типа, вертикальные, отсекающие	
	XXXII	240	85			
	XXXIII	278	75	До 2	Трещины открытого и закрытого типа, раскрытие до 5 см	Андезиты дацитовые
	XXXIV	95	85			
	XXXV	150	45	От 0,20 до 0,40	Трещины закрытого типа	Андезит-базальтовые порфириты
	XXXVI	55	85			
	XXXVII	220	65	От 0,20 до 0,80	Трещины открытого и закрытого типа, раскрытие от 1 до 4 см	
	XXXVIII	330	85	От 0,20 до 1,20	Секущие трещины	
	XXXIX	50	30	До 1	Отсекающие трещины	Андезитовые порфириты
	XXXX	300	85	От 0,10 до 0,40	Секущие трещины, по стенкам кварц-карбонатное вещество	
	XXXXI	300	20	От 1,0 до 1,5		

Таблица 3. Классификация систем трещин относительно борта карьера.
Table 3. Classification of crack systems relative to the side of the quarry.

Системы трещин	Положение относительно борта карьера	
	По простиранию	По падению
1 (XVII)	Диагональные, согласнопadaющие	Полoгие
2 (XVIII)	Продольные, несогласнопadaющие	Наклонные
3 (XIX)	Продольные, согласнопadaющие	Крутые
4 (XX)	Диагональные, несогласнопadaющие	Наклонные
5 (XXI)	Продольные, несогласнопadaющие	Наклонные
6 (XXII)	Диагональные, согласнопadaющие	Наклонные
7 (XXIII)	Продольные, несогласнопadaющие	Крутые
8 (XXIV)	Продольные, несогласнопadaющие	Крутые
9 (XXV)	Продольные, несогласнопadaющие	Наклонные
10 (XXVI)	Продольные, согласнопadaющие	Наклонные
11 (XXVII)	Продольные, согласнопadaющие	Наклонные
12 (XXVIII)	Диагональные, согласнопadaющие	Крутые
13 (XXIX)	Продольные, несогласнопadaющие	Крутые

Рисунок 2. Системы трещин: а – диагональные, согласнопadaющие; б – продольные, согласнопadaющие.
Figure 2. Crack systems: a – diagonal, bedding; b – longitudinal, bedding.

включала анализ пространственного положения трещин относительно направления простирания откосов и бортов карьера (табл. 3). Согласно классификации И. И. Попова [8], все трещины по направлению простирания подразделяются на продольные, диагональные и поперечные. Относительно плоскости откоса они делятся на согласнопadaющие и несогласнопadaющие. Наиболее опасными являются

продольные и диагональные согласнопadaющие с откосом системы трещин, поперечные согласнопadaющие системы не оказывают влияния на устойчивое состояние откоса. В табл. 3 приведена классификация систем трещин относительно северного борта карьера Камаган. Из выделенных систем трещин к наиболее опасным можно отнести 1, 3, 6, 10, 11, 12. Такие нарушения

Рисунок 3. Основные виды потери устойчивости (сдвиг клиновидного блока (Wedge)).

Figure 3. The main types of stability loss (wedge).

Рисунок 4. Нарушение устойчивости.

Figure 4. Destabilization.

Рисунок 5. Определение угла падения линии пересечения.

Figure 5. Determination of the angle of incidence of the line of intersection

Рисунок 6. Основные виды потери устойчивости (сдвиг призматического блока (Planar sliding)).

Figure 6. The main types of stability loss (shift of a prismatic block (planar sliding)).

Рисунок 7. Нарушение устойчивости.
Figure 7. Destabilization.

определяют блочность массива [13] и вероятные плоскости смещения этих блоков, что может привести к возникновению деформаций бортов карьера (рис. 2) [10, 15].

Оценку возможности проявления деформаций целесообразнее осуществлять с использованием кинематического анализа, позволяющего выявить потенциальные виды потери устойчивости. Кинематический анализ откосов с применением полярных диаграмм трещиноватости производит проверку геомеханического состояния скального массива на предмет соответствия условиям возникновения деформаций, а также определяет направление потенциального смещения блоков горных пород [11, 16].

Для диагональных, согласопадающих систем трещин 1, 6, 12 характерны потери устойчивости в виде сдвига клиновидного блока (Wedge) (рис. 3), при котором происходит скольжение блока горных пород, образованного 6 (1) и 12 системами трещин, по направлению падения линии пересечения двух плоскостей, отсекающих данный блок от скального массива. Возможность возникновения клиновой деформации определялась исходя из оценки ориентировки линии скрещения плоскостей. Значение угла падения линии пересечения $\alpha_{\text{скр}}$, при котором возможно скольжение породного блока, устанавливалась по соотношению $\varphi < \alpha_{\text{скр}} < \alpha$, где φ – угол внутреннего трения; α – угол наклона борта.

Деформация в виде сдвига клиновидного блока представлена на рис. 4.

Положение 6 и 12 систем трещин удовлетворяет условию $\varphi < \alpha_{\text{скр}} < \alpha$, так как угол падения линии пересече-

чения $\alpha_{\text{скр}} = 50^\circ$ (рис. 5) меньше, чем угол наклона борта карьера $\alpha = 60^\circ$, но больше, чем угол внутреннего трения $\varphi = 36-40^\circ$.

Для продольных, согласопадающих систем трещин 10, 11 характерен сдвиг призматического блока (Planar sliding), рис. 6, условием возникновения которого является наличие в породном массиве плоскостей ослабления, падающих в сторону выемки под углом $\alpha_{\text{пл}}$, более пологим, чем угол заоткоски уступа α , но более крутым, чем угол внутреннего трения $\varphi < \alpha_{\text{пл}} < \alpha$ с азимутом падения $A_{\text{з. пл}}$, отличающимся от направления падения уступа $A_{\text{з. уст}}$ не более чем на $\pm 20^\circ$.

Системы трещин 10 и 11 удовлетворяют условию $\varphi < \alpha_{\text{пл}} < \alpha$ (рис. 7), так как они имеют угол наклона (табл. 2) меньше, чем угол наклона борта карьера ($\alpha = 60^\circ$), но больше, чем угол внутреннего трения $\varphi = 36-40^\circ$.

Таким образом, установлено, что изучение и выявление в процессе отработки поверхностей ослабления и определение параметров их залегания необходимо для оценки возможности проявления деформаций и дальнейшей оценки устойчивости откосов [17]. Для северного борта карьера месторождения Камагам выделены системы трещин, негативно влияющих на его устойчивость. Установлено, что потенциальными видами потери устойчивости являются сдвиг клиновидного блока (Wedge), образованный 6 (1) и 12 системами трещин, и сдвиг призматического блока (Planar sliding), сформированный 10 и 11 системами трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А. Д., Панжин А. А., Мельник В. В. Обеспечение устойчивости бортов карьеров в целях защиты потенциально опасных участков транспортных берм // Вестник МГТУ. 2016. № 3. С. 5–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2016-14-3-5-12>
2. Мурзинов И.М. Управление устойчивостью откосов бортов карьера // ГИАБ. 2004. № 1. С. 62–64.
3. Tiwari G., Latha G. M. Design of Rock Slope Reinforcement: An Himalayan Case Study // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49 (6). P. 2075–2097. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0913-4>
4. Fleurisson J.A. Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach // Procedia Engineering. 2012. Vol. 46. P. 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.442>
5. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.

6. Чернышев С. Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. М.: Недра, 1984. 111 с.
7. Прокин В. А., Нечехин В. М., Сопко П. Ф. и др. Медноколчеданные месторождения Урала: геологические условия размещения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.
8. Серавкин И. Б. Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. М.: Наука, 1986. 268 с.
9. Колесатова О. С. Особенности структурного строения горного массива месторождения «Камаган» // Рациональное природопользование: сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2014. С. 20–24.
10. Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л., Шпакова М. В., Чумляков В. А. Влияние трещиноватости на устойчивость бортов карьера и ее изменчивость по площади и глубине на Горевском месторождении // ГИАБ. 2015. № 11. С. 32–40.
11. Бушков В. К. Применительная практика кинематического анализа устойчивости при обосновании параметров основных конструктивных элементов борта карьера // ГИАБ. 2018. № 10. С. 30–42. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-30-42>
12. Leong E. C., Rahardjo H. Two and three-dimensional slope stability reanalyses of Bukit Batok slope // Computers and Geotechnics. 2012. Vol. 42. P. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.01.001>
13. Reddy K. N., Krishna A. M. Stability Assessment of Rock Slope and Design of Rock Slope Reinforcement // Geotechnics for Transportation Infrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering / ed. by R. Sundaram, J. T. Shahu, V. Havanagi. Singapore: Springer, 2019. Vol. 28. P. 651–661. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6701-4_42
14. Жабко А. В. Критерий прочности блочных сред и обратные геомеханические расчеты // Изв. вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 37–47. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-37-47>
15. Латышев О. Г., Прищепа Д. В. Моделирование трещиноватого породного массива и исследование его напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов // Горный журнал. 2020. № 5. С. 15–25. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.05.01>
16. Годовников Н. А., Дунаев В. А. Вероятностный метод прогнозирования потенциальных деформаций уступов карьера в массивах скальных пород // ГИАБ. 2015. № 5. С. 81–83.
17. Vanneschi C., Di Camillo M., Aiello E., Bonciani F., Salvini R. SfM-MVS Photogrammetry for Rockfall Analysis and Hazard Assessment Along the Ancient Roman Via Flaminia Road at the Furlo Gorge (Italy) // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8(8). 325. <https://doi.org/10.3390/ijgi8080325>

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2020 года

Evaluation of the possibility of manifestation of deformations from the position of disturbance of the massif (using the Kamagan field as an example)

Oksana Sergeevna KOLESATOVA^{1,2*},
Elena Aleksandrovna GORBATOVA^{3**}

¹Technical University of UMMC, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovskaya Oblast', Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

³All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky, Moscow, Russia

Abstract

Introduction. The main task in the development of mineral deposits by open and underground methods is to ensure the safety of mining operations. As a result of long-time standing of the pit walls in the near edge zone massif, changes in natural stresses can occur, which lead to deformations. Prediction and prevention of deformation processes of the near-rock massif largely depend on reliable information about its structural features, including the structure of the massif and the degree of its disturbance.

Purpose of research is to assess the possibility of manifestation of deformations from the position of disturbance of the massif.

Methods of research. When assessing the possibility of deformation manifestation, a set of methods was used, including: full-scale measurements of fracturing; methods of mathematical statistics using the Stereonet program for processing measurement results; analysis of the spatial position of cracks relative to the direction of strike of the slopes and sides of the open pit with the identification of the most dangerous ones; kinematic analysis, allowing to determine potential types of loss of stability from the position of disturbance of the massif.

Result of research. In the southeastern, northern and western sides of the Kamagan open pit, 41 fracture systems have been identified; the prevailing systems are northwestern dip systems at angles of 50 ° – 85 °; south-east - at an angle of 50 ° and south-west - at an angle of 50 °. For example, for the northern side ($A_p = 90^\circ$; $n = 60^\circ$), it was found that potential types of destabilization are: wedge formed by systems of cracks with spatial characteristics $A_p = 65^\circ$; $n = 45^\circ$ and $A_p = 150^\circ$; $n = 90^\circ$, and planar sliding formed by systems of cracks with the parameters $A_p = 90^\circ$; $n = 55^\circ$ and $A_{pr} = 100^\circ$; $n = 42^\circ$.

Conclusions. Studies have proven the need to study and identify weakening surfaces in the process of mining and determine the parameters of their occurrence in order to assess the possibility of deformations and further assess the stability of slopes.

Keywords: deformations, crack systems, kinematic analysis, mass disturbance, loss of stability of the quarry side, fracture diagrams.

REFERENCES

1. Sashurin A. D., Panzhin A. A., Melnik V. V. 2016, Ensuring the stability of the pit walls in order to protect potentially dangerous areas of transport berms. *Vestnik MGTU* [Vestnik of Murmansk State Technical University], no. 3, pp. 5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2016-14-3-5-12>
2. Murzikov I. M. 2004, Pit slope stability management. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 1, pp. 62–64. (In Russ.)
3. Tiwari G., Latha G. M. 2016, Design of Rock Slope Reinforcement: An Himalayan Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49 (6), pp. 2075–2097. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0913-4>
4. Fleurisson J. A. 2012, Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach. *Procedia Engineering*, vol. 46, pp. 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.442>
5. Ratz M. V., Chernyshev S. N. 1970, *Treshchinovatost' i svoystva treshchinovatykh gornykh porod* [Fracturing and properties of fractured rocks]. Moscow, 164 p.
6. Chernyshev S. N. 1984, *Treshchinovatost' gornykh porod i yeye vliyaniye na ustoychivost' otkosov* [Fracturing of rocks and its effect on the stability of slopes]. Moscow, 111 p.
7. Prokin V. A., Necheukhin V. M., Sopko P. F. et al. 1985, *Mednokolchedannyye mestorozhdeniya Urala: geologicheskiye usloviya razmeshcheniya* [Copper pyrite deposits of the Urals: geological conditions of placement]. Sverdlovsk, 288 p.
8. Seravkin I. B. 1986, *Vulkanizm i kolchedannyye mestorozhdeniya Yuzhnogo Urala* [Volcanism and pyrite deposits of the southern Urals]. Moscow, 268 p.
9. Kolesatova O. S. 2014, *Osobennosti strukturnogo stroyeniya gornogo massiva mestorozhdeniya «Kamagan»* [Features of structural configuration of the mountain range of the "Kamagan" deposit]. *Rational nature management: collection of research papers*. Magnitogorsk, pp. 20–24.

✉ okolesatova@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-9307-9779>

** lena_gorbatova@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4251-2381>

10. Shpakov P. S., Yunakov Yu. L., Shpakova M. V., Chumlyakov V. A. 2015, Influence of fracturing on the stability of the pit walls and its variability in area and depth at the Gorevskoye field. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 11, pp. 32–40. (In Russ.)
11. Bushkov V. K. 2018, Applied practice of kinematic analysis of stability when justifying the parameters of the main structural elements of the pit side. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 10, pp. 30–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-30-42>
12. Leong E. C., Rahardjo H. 2012, Two and three-dimensional slope stability reanalyses of Bukit Batok slope. *Computers and Geotechnics*, vol. 42, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.01.001>
13. Reddy K. N., Krishna A. M. 2019, Stability Assessment of Rock Slope and Design of Rock Slope Reinforcement. *Geotechnics for Transportation Infrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering* / ed. by R. Sundaram, J. T. Shahu, V. Havanagi. Singapore: Springer, vol. 28, pp. 651–661. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6701-4_42
14. Zhabko A. V. 2020, Block media strength criterion and reverse geomechanical calculations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 6, pp. 37–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-37-47>
15. Latyshev O. G., Prishchepa D. V. 2020, Modeling of fractured rock mass and study of its stress-strain state by the finite element method. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], no. 5, pp. 15–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.05.01>
16. Godovnikov N. A., Dunaev V. A. 2015, Probabilistic method for predicting potential deformations of open pit benches in rock massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 5, pp. 81–83. (In Russ.)
17. Vanneschi C., Di Camillo M., Aiello E., Bonciani F., Salvini R. 2019, SfM-MVS Photogrammetry for Rockfall Analysis and Hazard Assessment Along the Ancient Roman Via Flaminia Road at the Furlo Gorge (Italy). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8(8). 325. <https://doi.org/10.3390/ijgi8080325>

The article was received on November 3, 2020