

УДК622.271.333 : 624.131.537

**Харисов Тимур Фаритович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории геомеханики  
подземных сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка д. 58,;  
доцент кафедры «Шахтное строительство»,  
Уральский государственный  
горный университет,  
620144, г. Екатеринбург,  
пер. Университетский, д. 7  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА  
ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ  
БОРТОВ КАРЬЕРА***Аннотация:*

Для определения и обоснования параметров бортов и уступов карьеров должен быть выполнен расчет коэффициента запаса устойчивости с помощью классических методов предельного равновесия. Для оценки существующих методов вычисления и выбора оптимального была выполнена многовариантная оценка устойчивости бортов и отдельных уступов карьера. Приведены результаты исследований устойчивости бортов карьера Киембаевского месторождения, где произошло обрушение уступов на западном борту. Для выявления причин обрушения и расчета устойчивости произведена актуализация физико-механических свойств пород, слагающих прибортовой массив. На основании полученных данных выполнен расчет коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) по фактическому контуру карьера. Выявлено, что фактическое состояние бортов и уступов карьера расходится с результатами расчетов. Таким образом, основной причиной нарушения являются не низкие прочностные свойства массива, а образование протяженных трещин сдвигового характера, вызванных процессами деформирования в условиях повышенного сжатия в одном направлении и депрессией во втором, с нарушением первичной структуры массива горных пород. Значения КЗУ, полученные различными методами (Федоровского-Курилло, Бишоп, Филлениуса, Ямбу), отличаются друг от друга в пределах 10 – 15 %. Для обеспечения безопасности ведения горных работ с учетом геомеханических условий отработки Киембаевского карьера была разработана конструкция наблюдательной станции для мониторинга деформационных процессов прибортового массива. Она включает в себя две традиционные профильные линии и две локальных наблюдательных станции. Наблюдения за состоянием прибортового массива далеко не всегда дают возможность предотвратить обрушения и оползни, но позволяют снизить возможный ущерб от них и особенно риск для людей, находящихся в карьере.

*Ключевые слова:* устойчивость бортов, карьер, уступы, параметры бортов, коэффициент запаса устойчивости, наблюдательная станция, реперы, мониторинг

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.108

**Kharisov Timur F.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Worker,  
Institute of Mining UB RAS,  
620075, Ekaterinburg,  
Mamina-Sibiryaka street, 58,  
Associate Professor  
on the chair "Mine construction",  
Ural State Mining University,  
620144, Ekaterinburg,  
Universitetskiy street 7  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**PROBLEM OF ASSESSMENT  
OF THE SAFETY FACTOR  
OF THE OPEN-PIT SIDES***Abstract:*

According to normative documents for definition and justification of parameters of pit sides and benches a calculation of safety factor by means of classical methods of extreme balance has been made. The article presents the results of the researches of slope stability of the Kiyembayevsky open-pit where the collapse of the benches on the western side had occurred. For identification of the causes of the collapsing and for calculation of stability the updating of physic-and-mechanical properties of the rocks composing the massif was made. On the basis of the obtained data calculation of the safety factor (SF) for the actual contour of a pit has been executed. It has been revealed that actual state of the sides and benches of the pit differs from results of calculations. Thus, not the low strength properties of the massif, but the formation of the extended cracks of shift character caused by processes of deformation in the conditions of the increased compression in one direction and the increased depression in the another direction with deformation of primary structure of the massif of rocks is the main cause for distortion. The SF values received by various methods (Fedorovsky-Kurillo, Bishop, Fillenius, Yanbu) differ from each other within 10 – 15%. For safety of conducting mining operations taking into account geomechanical conditions of the off-working of the Kiyembayevsky pit, the design of observing station has been developed for monitoring of deformation processes of the adjacent rock mass. It includes two traditional profile lines and two local observing stations. Observations of the current condition of the massif not always give the chance to prevent collapses and landslides, but allow to reduce possible damage from them and especially risk for the people who are in career.

*Keywords:* stability of quarry sides, pit, benches, parameters of sides, safety factor, observing station, control points, monitoring

### *Введение*

Обеспечение устойчивости бортов и локальных уступов карьеров является актуальной проблемой, от результата решения которой зависит безопасность и эффективность горнодобывающей промышленности. Нарушение даже одного участка уступа может парализовать действующий карьер, что влечет за собой большие финансовые потери.

Устойчивость бортов карьеров характеризуется коэффициентом запаса устойчивости, величина которого показывает относительное превышение прочности массива по сравнению со сдвигающими напряжениями. На стадии проектирования карьера для определения и обоснования параметров его бортов и уступов выполняется расчет коэффициента запаса устойчивости с учетом горно-геологических и гидрогеологических условий прибортового массива. Выбор оптимальных параметров бортов и локальных уступов карьера влияет на безопасность ведения горных работ и экономическую эффективность предприятия. Слишком большой угол борта отрицательно сказывается на его устойчивости, а слишком пологие и устойчивые борта карьера увеличивают объемы вскрышных работ, что ведет к негативным экономическим последствиям [1 – 2].

Существует множество методик расчета коэффициента запаса устойчивости: В.Г. Федоровского и С.В. Курилло, Феллениуса, Бишопа, Спенсера, Ямбу и т. д. Однако основой для оценки устойчивости бортов карьеров служат методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров, разработанные Г.Л. Фисенко в 1972 г. [6].

Целью исследования является обеспечение безопасного ведения горных работ при разработке карьера, сравнение основных существующих методов расчета коэффициента запаса устойчивости бортов карьеров для выявления наиболее оптимальных.

### *Объект исследования*

Исследуемый прибортовой массив, где расположен Кiemбаевский карьер по добыче хризолит-асбеста АО «Оренбургские минералы», приурочен к скальному и полускальному трещиноватому комплексу пород. Асбестовые руды и вмещающие породы месторождения представлены серпентинитами, серпентинитами с ядрами перидотитов и серпентинизированными перидотитами, которые в тектонических зонах прорваны дайками диоритовых порфиритов, микродиоритов и гранатопироксеновых пород.

17.04.2017 произошло обрушение уступов западного борта. Обрушение захватило участок длиной по простиранию более 500 м и по высоте от отметки 240 до 315 м.



Рис. 1 – Нарушенный участок западного борта Кiemбаевского карьера

Для актуализации и анализа физико-механических свойств вмещающих пород и руд были отобраны образцы непосредственно на уступах карьера для последующих испытаний их прочностных свойств. По результатам испытаний были построены паспорта прочности пород и определены показатели угла внутреннего трения и сцепления в образце (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты испытаний прочностных свойств пород в образце [4]**

№ пробы	Порода	Местоположение		Предел прочности, МПа		Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
		Борт	Горизонт, м	При сжатии	При растяжении		
21	Выветрелый серпентинит с прожилками магнезита	восточный	360	87,6	6,1	22,2	36,5
22	Слабоизмененный серпентинит	восточный	330	116,7	19,9	36,0	26,6
22	Слабоизмененный серпентинит	восточный	330	171,4	17,4	47,2	32,3
22	Слабоизмененный серпентинит	восточный	330	124,0	17,9	36,9	28,4
23	Неизмененный серпентинит	восточный	315	125,9	12,7	34,6	32,4
24	Слабоизмененный серпентинит	восточный	285	108,9	7,1	27,1	37,1
25	Неизмененный серпентинит	восточный	270	93,8	9,4	25,8	32,4
26	Руда		225	82,9	9,2	23,3	31,3
27	Серпентинит зеленый с черными прожилками	западный	330	39,1	4,5	11,1	30,9
37	Неизмененный серпентинит с трещинами	западный	315	80,0	7,1	21,4	33,7

Следует отметить, что прибортовой массив карьера характеризуется большим многообразием заполнителей трещин, прочностные характеристики которых представлены в табл. 2. При этом незалеченных трещин очень мало. Свойства контактов в наибольшей степени будут оказывать влияние на устойчивость отдельных уступов и небольших трещиноватых участков бортов и в меньшей степени – на устойчивость всего борта в целом.

Таблица 2

**Прочностные характеристики контактов во вмещающем массиве Киёмбаевского месторождения**

Заполнитель трещин	Сцепление, т/м <sup>2</sup>	Угол трения, град
Брусит	4	15
Магнезит	6 – 8	15
Серпентинит	10	20
Тальк	2	12
Офит	8	15
Асбестофит	10 – 20	22
Гематит	8	15
Глинка трения	2	12

Прочностные свойства трещиноватого массива значительно отличаются от прочности образцов, полученных при актуализации физико-механических свойств пород, и для перехода от сцепления пород в образце  $C_0$  к сцеплению в массиве  $C_M$  используется коэффициент структурного ослабления  $\lambda$ :

$$C_M = \lambda C_0. \quad (1)$$

При расчете прочностных свойств прибортового массива восточного борта использовались средние значения физико-механических свойств пород в образцах проб № 21 – 25, а для западного и южного бортов использовались средние значения прочностных свойств пород в образцах проб № 27 и 37.

На основании выполненных расчетов были определены характеристики массива, представленные в табл. 3.

Таблица 3

**Расчитанные значения физико-механических свойств пород  
Киембаевского карьера**

Плотность, $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Сцепление, $C_n$ , т/м <sup>2</sup>	Угол внутреннего трения, $\varphi_n$ , град	Цвет отображения пород на расчетной схеме
Для прибортового массива восточного борта			
2,45	28,0	21,3	
Для прибортового массива западного и южного бортов			
2,45	16,0	21,3	

*Методы исследования*

Для определения причин произошедшего нарушения и разработки мероприятий, обеспечивающих безопасное ведение горных работ, была выполнена многовариантная оценка устойчивости бортов карьера по фактическому контуру на основании актуализированных физико-механических свойств пород, слагающих прибортовой массив (табл. 3).

Для расчета устойчивости бортов и уступов карьера построено 6 расчетных сечений, плановое положение которых представлено на рис. 2. Расчетные сечения проходят через потенциально опасные участки № 1 – 7, выявленные по результатам комплексного анализа влияющих негативных факторов на западном, восточном и южном бортах Киембаевского асбестового карьера. Коэффициент запаса устойчивости уступов на потенциально опасном участке № 1 представляет особый интерес, так как именно на этом участке произошло нарушение участка борта.

В программном комплексе SCAD Office «Откос» была произведена многовариантная оценка устойчивости бортов карьера и его уступов с использованием четырех классических методов: Федоровского-Курилло, Бишоп (упрощенный), Филлениуса, Ямбу (упрощенный). Методы отличаются друг от друга способом построения поверхности скольжения и используемым в расчетах математическим аппаратом. Подробное описание методов представлено в литературных источниках [9 – 12].

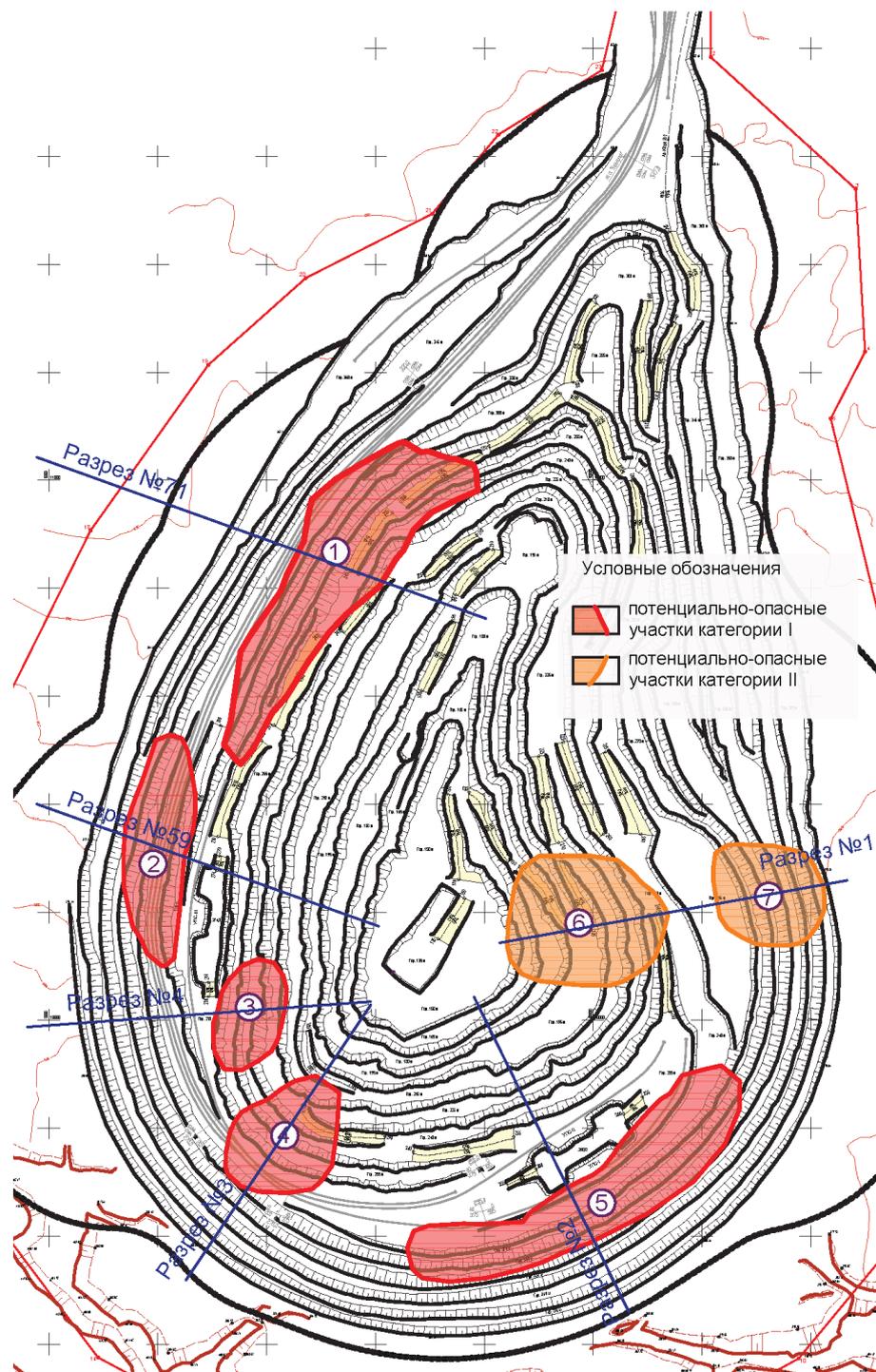


Рис. 2 – Схема расположения расчетных сечений для оценки устойчивости бортов и уступов Киембаевского карьера

#### *Результаты исследований*

Результаты вычисления коэффициента запаса устойчивости по фактическому контуру представлены в табл. 4. На рис. 3 представлена схема наиболее вероятных поверхностей скольжения на расчетном сечении, совпадающим с положением геологического разреза № 71, по фактическому контуру Киембаевского карьера, где произошло обрушение уступов.

Таблица 4

**Результаты вычисления коэффициента запаса устойчивости  
по фактическому контуру**

Номер задачи	Коэффициент запаса устойчивости, рассчитанный различными методами				Средний коэффициент запаса	Цвет линии скольжения
	<i>Федоровского – Курилло</i>	<i>Филленцуса</i>	<i>Бишопа (упрощенный)</i>	<i>Янбу (упрощенный)</i>		
<b>Линия разреза № 1 (восточный борт)</b>						
<i>1</i>	1,724	1,695	1,809	1,677	1,726	
<i>2</i>	1,242	1,224	1,291	1,159	1,229	
<i>3</i>	1,626	1,592	1,677	1,488	1,596	
<i>4</i>	2,038	2,044	2,068	1,882	2,008	
<i>5</i>	2,9	2,883	3,071	2,638	2,873	
<b>Линия разреза № 3 (юго-западный борт)</b>						
<i>1</i>	1,334	1,331	1,422	1,313	1,350	
<i>2</i>	2,494	2,53	2,673	2,272	2,492	
<i>3</i>	1,264	1,245	1,308	1,175	1,248	
<i>4</i>	2,015	2,002	2,136	1,894	2,012	
<i>5</i>	2,211	2,213	2,36	2,055	2,210	
<b>Линия разреза № 4 (западный борт)</b>						
<i>1</i>	1,359	1,344	1,418	1,335	1,364	
<i>2</i>	1,137	1,13	1,18	1,081	1,132	
<i>3</i>	2,02	2,018	2,151	1,900	2,022	
<i>4</i>	2,122	2,119	2,24	1,970	2,113	
<b>Линия № 2 (юго-восточный борт)</b>						
<i>1</i>	1,695	1,675	1,762	1,412	1,636	
<i>2</i>	0,962	0,964	0,9861,041	0,929	0,960	
<i>3</i>	0,946	0,929	0,967	0,904	0,937	
<i>4</i>	2,169	2,158	2,285	2,010	2,156	
<i>5</i>	1,129	1,099	1,131	1,051	1,103	
<b>Линия геологического разреза № 59 (западный борт)</b>						
<i>1</i>	1,459	1,444	1,522	1,431	1,464	
<i>2</i>	1,871	1,943	1,987	1,738	1,885	
<i>3</i>	1,367	1,347	1,446	1,303	1,366	
<i>4</i>	1,999	1,928	2,104	1,846	1,969	
<i>5</i>	1,638	1,618	1,724	1,595	1,644	
<i>6</i>	1,345	1,35	1,394	1,272	1,340	
<b>Линия геологического разреза № 71 (западный борт)</b>						
<i>1</i>	1,444	1,413	1,51	1,41	1,444	
<i>2</i>	1,259	1,274	1,328	1,208	1,267	
<i>3</i>	1,779	1,779	1,869	1,66	1,772	
<i>4</i>	1,143	1,124	1,175	1,07	1,128	

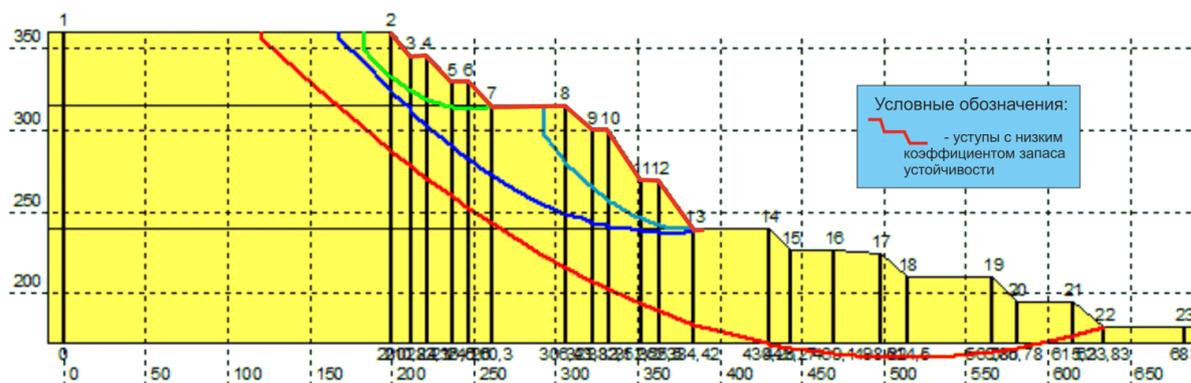


Рис. 3 – Схема наиболее вероятных поверхностей скольжения на линии геологического разреза № 71 (западный борт)

Исходя из полученных результатов расчетов видно, что значения коэффициента запаса устойчивости, полученные различными методами, отличаются друг от друга в пределах 10 – 15 %. Южный, западный и восточный борта находятся в устойчивом состоянии с минимальным коэффициентом запаса устойчивости 1,350 у юго-западного борта и максимальным коэффициентом 1,726 у восточного борта карьера.

На линии разреза № 2 отдельные уступы на потенциально опасных участках бортов карьера находятся в неустойчивом состоянии и имеют коэффициент запаса устойчивости 0,937 и 0,960. Однако при визуальном обследовании данного участка борта каких-либо нарушений, деформаций или трещинообразования выявлено не было.

На геологическом разрезе № 71 в интервале горизонтов 230 – 315 м, где произошло обрушение уступов, при расчете классическими методами коэффициент запаса устойчивости составил 1,128, то есть уступы находятся в устойчивом состоянии, однако в реальности это не так.

Исходя из полученных результатов расчета можно сделать вывод, что классические методы алгебраического и векторного сложения сил, которые согласно существующим нормативным документам [7 – 8] необходимо выполнять для оценки устойчивости бортов карьеров, не всегда достоверно ее отражают.

В настоящее время все большее распространение приобретает метод математического моделирования. Однако в простых условиях результаты вычислений, полученные с помощью обоих методов, как правило, близки между собой (рис. 4) [13].

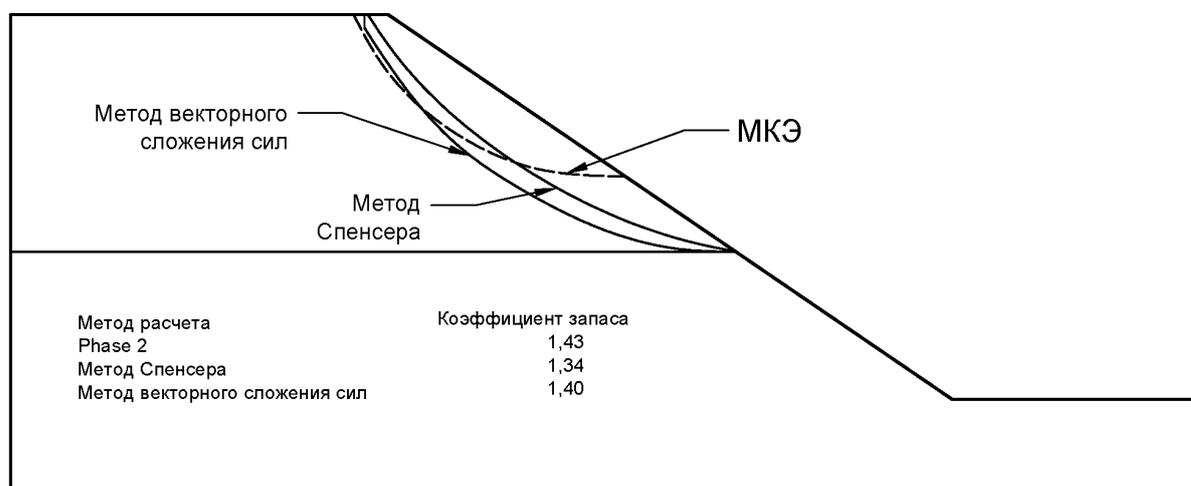


Рис. 4 – Поверхности скольжения в прибортовом массиве, полученные различными методами (МКЭ – метод конечных элементов) [13]

Причина заключается в том, что математическое моделирование обычно не учитывает трещинообразование, которое в блочной напряженно-деформированной среде представляет собой очень сложный процесс, включающий как детерминированную, так и стохастическую составляющие [13– 15].

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что причиной нарушения исследуемого участка борта карьера являются не низкие прочностные характеристики массива, а образование протяженных трещин сдвигового характера, вызванных дилатационными процессами деформирования в условиях повышенного сжатия в одном направлении и депрессией во втором, с нарушением первичной структуры массива горных пород.

Так как учет данного фактора является практически невозможным, то для обеспечения безопасного функционирования карьера необходимо проводить мониторинг деформаций прибортового массива в процессе разработки месторождения. Систематический контроль за состоянием уступов, бортов и территорий, прилегающих к карьеру, является необходимым условием бесперебойной работы горного предприятия [16 – 17].

На основании требований нормативных документов [18], а также с учетом геомеханических условий отработки Киембаевского карьера, была разработана конструкция наблюдательной станции для мониторинга деформационных процессов (рис. 5). Наблюдательная станция построена по принципу от общего к частному и включает в себя существующий на территории месторождения геодинамический полигон, две традиционные профильные линии, а также две локальных наблюдательных станции (рис. 6 – 7). Реперы закладываются как на дневной поверхности, примыкающей к карьеру, так и непосредственно в бермы уступов, поставленных на предельный контур. Систематические маркшейдерские наблюдения на разработанной наблюдательной станции позволят получать необходимую информацию о деформациях бортов карьеров, являющуюся основой для прогноза их устойчивости.

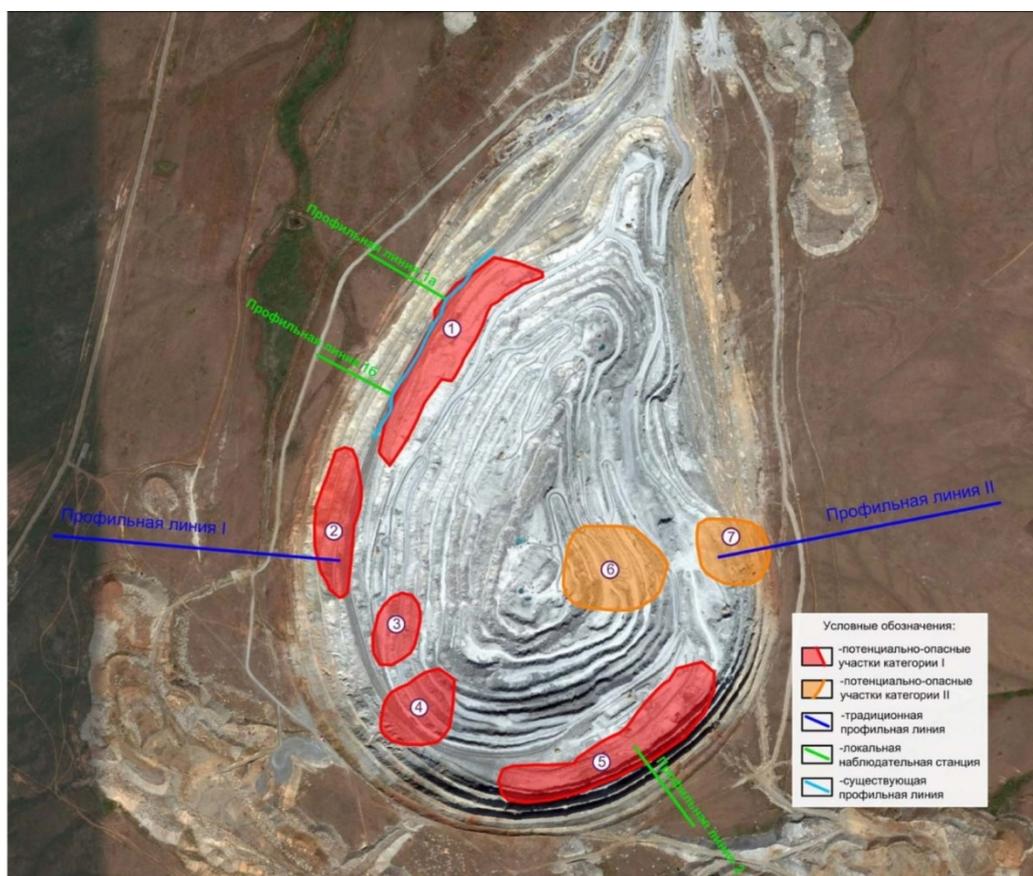


Рис. 5 – Схема наблюдательной станции Киембаевского карьера

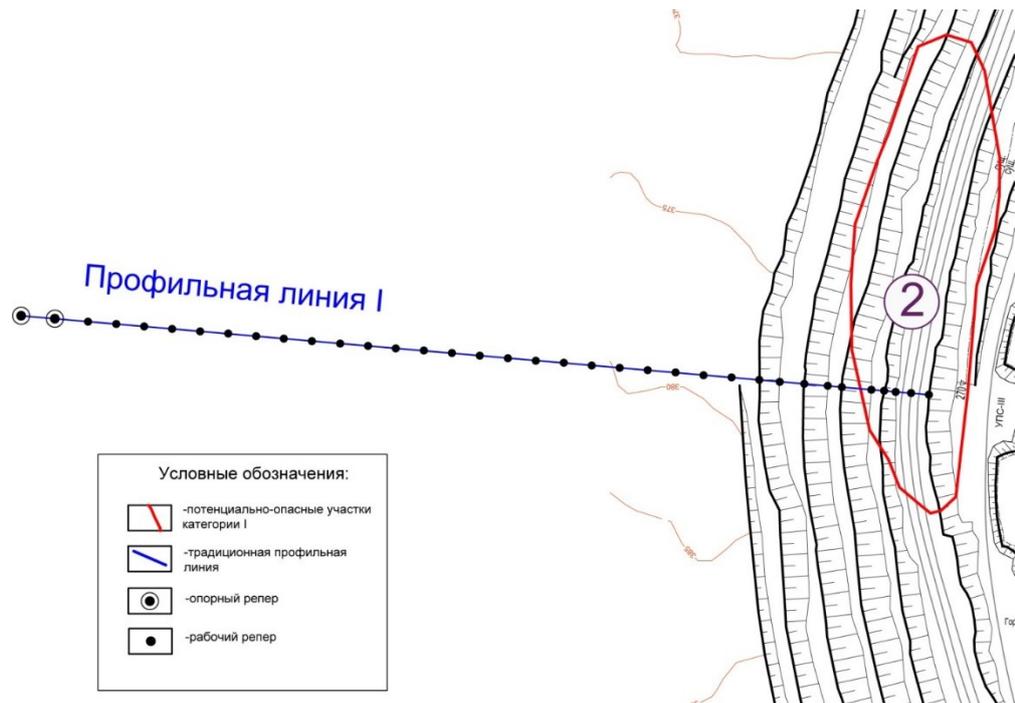


Рис. 6 – Схема Профильной линии I

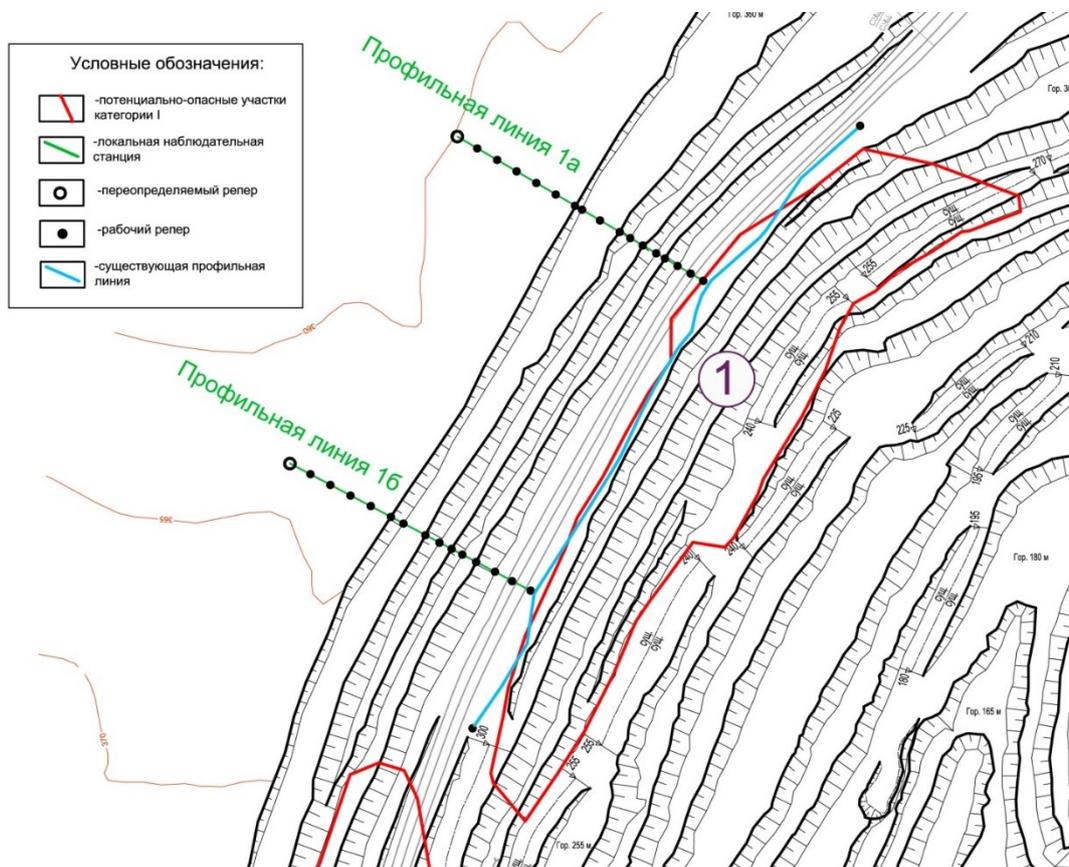


Рис. 7 – Схема локальной наблюдательной станции Северо-Запад

### Выводы

Трещиноватый скальный массив представляет собой сложную иерархически-блочную среду. Учет всех факторов, оказывающих негативное воздействие на устойчивость бортов карьеров, является крайне сложной и зачастую невыполнимой задачей.

Классические методы расчета коэффициента запаса устойчивости (Федоровского-Курилло, Филлениуса, Ямбу, Бишоп) и компьютерное моделирование не всегда позволяют достоверно оценить устойчивость бортов карьера, особенно в трещиноватых тектонически напряженных скальных массивах.

Для обеспечения безопасного ведения горных работ необходимо проводить постоянный мониторинг деформаций прибортового массива в процессе разработки месторождения.

Наблюдения за состоянием прибортового массива далеко не всегда дают возможность предотвратить обрушения и оползни, но позволяют снизить возможный ущерб от них и особенно риск для людей, находящихся в карьере.

### Литература

1. Козырев А.А. Геомеханическое обоснование рациональных конструкций бортов карьеров в тектонически напряженных массивах / А.А. Козырев, В.В. Рыбин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2015. - № 2. - С. 245 - 250.
2. Рыбин В.В. Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах / В.В. Рыбин // Горный институт Кольского НЦ РАН. - Апатиты, 2016
3. Ericsson M. E&M's annual survey of global mining investment / Ericsson M., Larsson V. // Engineering & Mining Journal. - 2013. - Vol. 214. No. 1. - P. 28 - 33.
4. Сашурин А.Д. Механизм формирования аварийных ситуаций различного масштаба вследствие современных геодинамических движений / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин // Черная металлургия. - 2017. - № 1 (1405). - С. 21-25.
5. Sashurin A.D. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade-quartz veins / Sashurin A.D., Panzhin A.A., Kharisov T.F., Knyazev D.Yu. // Eurasian Mining. - 2016. - № 2 (26). - С. 3 - 5.
6. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. - Л.: ВНИМИ, 1972. - 178 с.
7. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. - Л.: ВНИМИ, 1987. - 127 с.
8. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. - СПб., 1998. - 208 с.
9. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко. - М.: Недра, 1965. - 378 с.
10. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов / Я.Х. Хуан. - М.: Стройиздат, 1988.
11. Федоровский В.Г. Метод расчета устойчивости откосов и склонов / В.Г. Федоровский, С.В. Курилло // Геоэкология. - 1997. - № 6. - С. 95 - 106.
12. Федоровский В.Г. Метод переменной степени мобилизации сопротивления грунту для расчета прочности грунтовых массивов / В.Г. Федоровский, С.В. Курилло // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1998. - № 4/5. - С. 18 - 22.
13. Цирель С.В. Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров / С.В. Цирель, А.А. Павлович // Горный журнал. - 2017. - № 7. - С. 39 - 45.

14. Кочарян Г.Г. Иерархия структурных и геодинамических характеристик земной коры / Г.Г. Кочарян, А.А. Спивак // Геология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2002. - № 6. - С. 537 - 550.

15. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде / А.А. Лукк, А.В. Дещеревский, А.Я. Сидорин, И.А. Сидорин. - М.: ОИФЗ РАН, 1996. - 200 с.

16. Желтышева О.Д. Современные технологии мониторинга устойчивости бортов карьеров / О.Д. Желтышева, Е.Ю. Ефремов // Маркшейдерия и недропользование. - 2014. - № 5 (73). - С. 63 - 66.

17. Панжин А.А. Геодинамический мониторинг на Узельгинском месторождении / А.А. Панжин, А.Д. Сашурин, Н.А. Панжина // Маркшейдерия и недропользование. - 2016. - Т. 1. - № 3 (83). - С. 30 - 35.

18. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 118 с.