

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ И УСТУПОВ КАРЬЕРА КИЕМБАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ХАРИСОВ Т. Ф., ХАРИСОВА О. Д., ЕФРЕМОВ Е. Ю., КОНОВАЛОВА Ю. П.

Согласно нормативным документам, для определения и обоснования параметров бортов и уступов карьеров должен быть выполнен расчет коэффициента запаса устойчивости с помощью классических методов предельного равновесия. Данные методы не учитывают такие факторы, как современная геодинамика и параметры структурных нарушений в массиве, которые оказывают негативное влияние на устойчивость бортов и уступов карьеров. В статье приведены результаты исследований устойчивости бортов карьера Кiemбаевского месторождения, где произошло обрушение уступов на западном борту. Для выявления причин обрушения произведена актуализация физико-механических свойств пород, слагающих прибортовой массив. На основании полученных данных выполнен расчет коэффициента запаса устойчивости по фактической контуре карьера. Результаты расчетов показали, что борта и уступы карьера находятся в устойчивом состоянии, но в реальности это не подтверждается. 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. С учетом геомеханических условий отработки Кiemбаевского карьера была разработана конструкция наблюдательной станции для мониторинга деформационных процессов прибортового массива, включающая две традиционные профильные линии и две локальные наблюдательные 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; трещиноватость; прибортовой массив; поверхность скольжения; коэффициент запаса устойчивости; наблюдательная станция; реперы; мониторинг.

По сравнению с подземными разработками, количество месторождений, разрабатываемых открытым способом, преобладает. На его долю приходится около 83 % мировой добычи руд и около 50 % мировой добычи угля, что делает проблему обеспечения устойчивости бортов карьеров весьма актуальной для горной науки и горнодобывающей промышленности [1].

На стадии проектирования карьера для определения и обоснования параметров его бортов выполняется расчет коэффициента запаса устойчивости, который учитывает геологическое строение массива, его обводненность, прочностные ха-

Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: timur-ne@mail.ru

Харисова Ольга Дмитриевна – младший научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: olgzheltysheva@gmail.com

Ефремов Евгений Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: efremov-eu@mail.ru

Коновалова Юлия Павловна – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: lisjul@mail.ru

раактеристики пород. Однако остаются неучтенными такие факторы, как современная геодинамика и параметры структурных нарушений в массиве, а именно системы трещин, их направление по простиранию, угол падения, заполнитель и раскрытие, которые оказывают негативное влияние на устойчивость бортов и уступов карьеров [2, 3].

Объект исследования. Примером проявления негативного влияния перечисленных факторов является Кiemбаевский карьер по добыче хризотил-асбеста АО «Оренбургские минералы», где в апреле 2017 г. произошло обрушение уступов западного борта. Обрушение захватило участок длиной более 500 м по простиранию и по высоте от отметки 240 м до 315 м (рис. 1).



Рис. 1. Нарушенный участок западного борта Кiemбаевского карьера

Исследуемый массив Кiemбаевского месторождения 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 порфириров, микродиоритов и гранатопироксеновых пород [4].

Для анализа физико-механических свойств вмещающих пород и руд непосредственно на уступах карьера были отобраны образцы 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) [4].

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 оказывают влияние на устойчивость отдельных уступов и небольших трещиноватых участков бортов и в меньшей степени – на устойчивость всего борта в целом [4].

Прочностные свойства трещиноватого массива значительно отличаются от прочности образца, и для перехода от сцепления пород в образце C_0 к сцеплению в массиве C_m используется коэффициент структурного ослабления λ :

$$C_m = \lambda C_0, \quad (1)$$

величина которого зависит от факторов, связанных с характером структурного строения массива, его однородностью и прочностью пород.

Сцепление пород в массиве приближенно может быть определено по формуле:

$$C_m = \frac{C_0 - C}{1 + a \ln(H/l_T)} + C, \quad (2)$$

где C – сцепление по контактам между блоками; a – коэффициент, зависящий от прочности пород в образце и характера трещиноватости; H – высота борта, м; l_T – средний размер блоков, м.

Таблица 1

Результаты испытаний прочностных свойств пород в образце

Номер пробы	Порода	Местоположение		Предел прочности, МПа		Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
		борт	горизонт, м	при сжатии	при растяжении		
21	Выветрелый серпентинит с прожилками магнетита	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

При расчетах устойчивости бортов карьера в характеристики сопротивления сдвигу вводится коэффициент запаса n , который в соответствии с рекомендациями «Правил...» [5–7] принимается равным 1,5. Расчетные характеристики прочности пород определяются по формулам:

$$C_n = \frac{C_m}{n}, \quad (3)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{\operatorname{tg} \varphi}{n}. \quad (4)$$

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 по формулам (1)–(4) расчетов были определены характеристики массива, представленные в табл. 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).

Таблица 2

Прочностные характеристики контактов во вмещающем массиве Киембаевского месторождения

Заполнитель трещин	Сцепление, т/м ²	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

Для расчета устойчивости бортов и уступов карьера построено шесть 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 [8] на западном, восточном и южном бортах Киембаевского асбестового карьера.

Таблица 3

Принятые значения физико-механических свойств пород Киембаевского карьера

Плотность γ , т/м ³	Сцепление C_n , т/м ²	Угол внутреннего трения ϕ_n , град
Для прибортового массива восточного борта		
2,45	28,0	21,3
Для прибортового массива западного и южного бортов		
2,45	16,0	21,3

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].

Результаты исследований. Результаты вычисления коэффициента запаса устойчивости по фактическому контуру представлены в табл. 4. На рис. 3 представлена схема наиболее вероятных поверхностей скольжения на расчет-

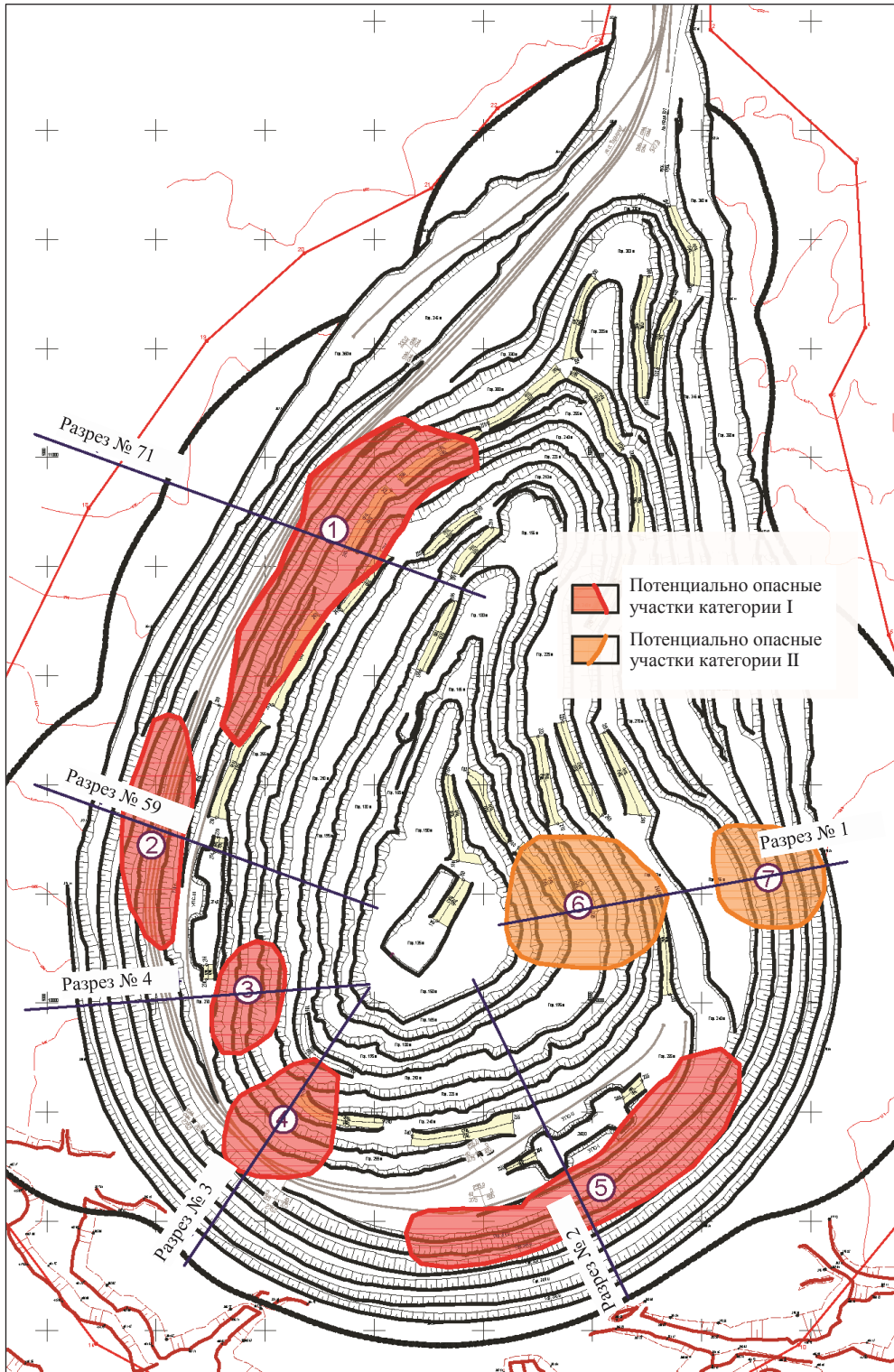


Рис. 2. Схема расположения расчетных сечений для оценки устойчивости бортов и уступов Киямбаевского карьера

ном сечении, совпадающем 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	Автоматический подбор наиболее вероятной поверхности скольжения (интервал по горизонтальной оси расчетной схемы)	
	Федоровского–Курилло	Филлениуса	Бишопа (упр.)	Янбу (упр.)		Левая граница, м	Правая граница, м
Линия разреза № 1 (восточный борт)							
1	1,724	1,695	1,809	1,677	1,726	0/200	795/855
2	1,242	1,224	1,291	1,159	1,229	0/200	364/465
3	1,626	1,592	1,677	1,488	1,596	475/545	630/692
4	2,038	2,044	2,068	1,882	2,008	269/285	364/465
5	2,900	2,883	3,071	2,638	2,873	0/200	269/285
Линия разреза № 3 (юго-западный борт)							
1	1,334	1,331	1,422	1,313	1,350	0/200	742/816
2	2,494	2,53	2,673	2,272	2,492	0/200	243/260
3	1,264	1,245	1,308	1,175	1,248	281/297	355/368
4	2,015	2,002	2,136	1,894	2,012	321/328	550/573
5	2,211	2,213	2,360	2,055	2,210	355/405	497/536
Линия разреза № 4 (западный борт)							
1	1,359	1,344	1,418	1,335	1,364	0/200	730/780
2	1,137	1,130	1,180	1,081	1,132	0/200	346/367
3	2,020	2,018	2,151	1,900	2,022	403/451	584/607
4	2,122	2,119	2,24	1,970	2,113	584/607	684/702
Линия разреза № 2 (юго-восточный борт)							
1	1,695	1,675	1,762	1,412	1,636	0/200	804/851
2	0,962	0,964	0,986	0,929	0,960	0/200	378/396
3	0,946	0,929	0,967	0,904	0,937	249/269	378/396
4	2,169	2,158	2,285	2,010	2,156	518/562	643/670
5	1,129	1,099	1,131	1,051	1,103	321/337	378/396
Линия разреза № 59 (западный борт)							
1	1,459	1,444	1,522	1,431	1,464	0/200	821/866
2	1,871	1,943	1,987	1,738	1,885	0/200	264/282
3	1,367	1,347	1,446	1,303	1,366	0/200	396/470
4	1,999	1,928	2,104	1,846	1,969	264/282	396/470
5	1,638	1,618	1,724	1,595	1,644	396/470	396/470
6	1,345	1,350	1,394	1,272	1,340	0/200	302/316
Линия разреза № 71 (западный борт)							
1	1,444	1,413	1,510	1,410	1,444	0/200	634/683
2	1,259	1,274	1,328	1,208	1,267	0/200	348/430
3	1,779	1,779	1,869	1,660	1,772	0/200	260/285
4	1,143	1,124	1,175	1,070	1,128	260/360	384/430

Значения коэффициента запаса устойчивости, полученные различными методами расчета, отличаются друг от друга в пределах 10–15 %. Южный, западный и восточный борты находятся в устойчивом состоянии с минимальным коэффи-

циентом запаса устойчивости 1,350 у юго-западного борта и максимальным коэффициентом 1,726 у восточного борта карьера. Однако отдельные уступы на потенциально опасных участках бортов карьера находятся в граничном состоянии и имеют коэффициент запаса устойчивости от 0,937 до 0,960.

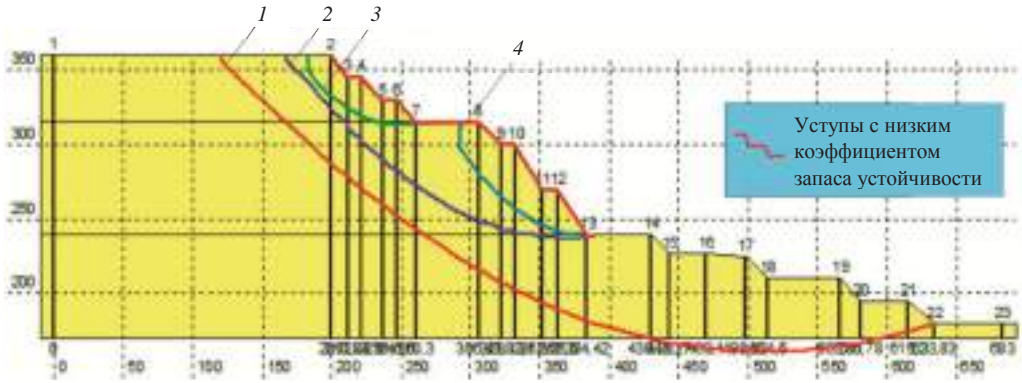


Рис. 3. Схема наиболее вероятных поверхностей скольжения на линии геологического разреза № 71 (западный борт):
1 – коэффициент запаса устойчивости 1,444; 2 – коэффициент запаса устойчивости 1,267; 3 – коэффициент запаса устойчивости 1,772; 4 – коэффициент запаса устойчивости 1,128

На участке борта на геологическом разрезе № 71 в интервале горизонтов 230–315 м, где произошло обрушение уступов, при расчете классическими методами коэффициент запаса устойчивости составил 1,128, т. е. по показателям 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 [6–7] необходимо применять для оценки устойчивости бортов карьеров, не всегда достоверны.

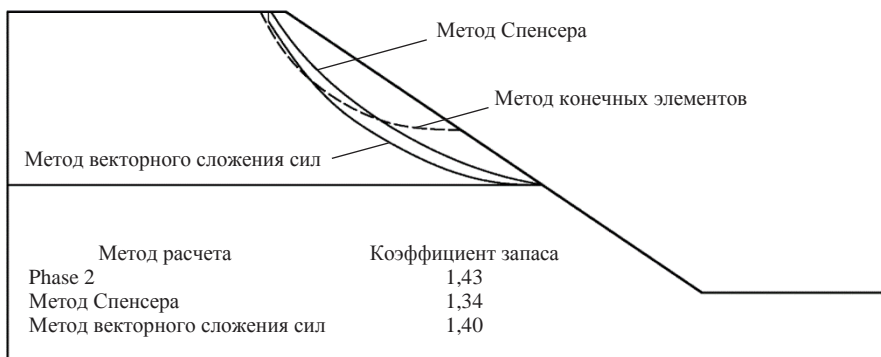


Рис. 4. Поверхности скольжения в прибортовом массиве, полученные различными методами

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].

Причина заключается в том, что математическое моделирование обычно не учитывает трещинообразование, которое в блочной напряженно-деформирован-

ной среде представляет собой очень сложный процесс, включающий как детерминированную, так и стохастическую составляющие [13–15].

Исходя из сказанного 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 депрессии во втором, с нарушением первичной структуры массива горных пород.



Рис. 5. Схема наблюдательной станции Кiemбаевского карьера

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 состояния уступов, бортов и территорий, прилегающих к карьере, является необходимым условием бесперебойной работы горного предприятия [16–17].

На основании требований нормативных документов [18], с учетом геомеханических условий отработки Кiemбаевского карьера была разработана конструкция наблюдательной станции для мониторинга деформационных процессов. 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 локальные наблюдательные станции (рис. 5). 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 позволяют получать необходимую информацию о деформациях бортов карьера, являющуюся основой для прогноза их устойчивости.

Итак, 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 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 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ericsson M., Larsson V. E&M's annual survey of global mining investment // *Engineering & Mining Journal*. 2013. Vol. 214. No. 1. P. 28–33.
2. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Механизм формирования аварийных ситуаций различного масштаба вследствие современных геодинамических движений // *Черная металлургия*. 2017. № 1 (1405). С. 21–25.
3. Sashurin A. D., Panzhin A. A., Kharisov T. F., Knyazev D. Yu. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins // *Eurasian Mining*. 2016. No. 2 (26). P. 3–5.
4. Исследование инженерно-геологических условий разработки и обоснование предельных углов наклона бортов карьера Кiemбаевского асбестового ГОКа: отчет о НИР / ИГД УрО РАН, рук. Сашурин А. Д., Яковлев А. В. Екатеринбург, 2002. 164 с.
5. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1971. 178 с.
6. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. Л.: ВНИМИ, 1987. 127 с.
7. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. СПб: ВНИМИ, 1998. 208 с.
8. Исследование геомеханических условий, причин и закономерностей нарушения устойчивости бортов карьера АО «Оренбургские минералы» и разработка мероприятий по безопасному ведению горных работ: отчет о НИР / ИГД УрО РАН, рук. Сашурин А. Д. Екатеринбург, 2017. 188 с.
9. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.
10. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1988. 240 с.
11. Федоровский В. Г., Курилло С. В. Метод расчета устойчивости откосов и склонов // *Геоэкология*. 1997. № 6. С. 95–106.
12. Федоровский В. Г., Курилло С. В. Метод переменной степени мобилизации сопротивления грунту для расчета прочности грунтовых массивов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1998. № 4/5. С. 18–22.
13. Цирель С. В., Павлович А. А. Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // *Горный журнал*. 2017. № 7. С. 39–45.
14. Кочарян Г. Г., Спивак А. А. Иерархия структурных и геодинамических характеристик земной коры // *Геология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2002. № 6. С. 537–550.
15. Лукк А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 200 с.
16. Желтышева О. Д., Ефремов Е. Ю. Современные технологии мониторинга устойчивости бортов карьеров // *Маркшейдерия и недропользование*. 2014. № 5 (73). С. 63–66.
17. Панжин А. А., Сашурин А. Д., Панжина Н. А. Геодинамический мониторинг на Узельгинском месторождении // *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.

RESEARCH OF STABILITY OF EDGES AND BENCHES OF THE KIYEMBAYEVSKY FIELD OPEN-PIT

Kharisov T. F., Kharisova O. D., Efremov E. Iu., Konovalova Iu. P. – The Institute of Mining, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: timur-ne@mail.ru

According to normative documents, for the definition and justification of parameters of edges and benches of open-pits, stability factor of safety calculation should be fulfilled by means of classical methods of extreme balance. These methods don't consider such factors as modern geodynamics and parameters of structural disturbances in the massif, which exert negative impact on stability of edges and benches of open-pits. Results of researches on the Kiyembayevsky field open-pit edges stability are given in article, where the western bench edges collapse took place. Updating of physical-mechanical properties of rock composing the adjacent rock massif is made to identify the collapse reasons. On the basis of the obtained data, stability factor of safety calculation is fulfilled according to the actual contour of an open-pit. Results of calculations have shown that edges and benches of an open-pit are in a steady state, but in reality it isn't confirmed. These are not low strength properties of the massif, but the formation of the extended cracks of shift character caused by the processes of deformation in the conditions of the increased compression in one direction and a depression in the second direction with violation of primary structure of the massif of rocks, which is the main reason for violation. Taking into account geomechanical conditions of working off of the Kiyembayevsky open-pit, the design of observing station has been developed for monitoring of deformation processes of the adjacent rock massif. It includes two traditional profile lines and two local observing stations. Observations of a condition of the adjacent rock massif not always give the chance to prevent collapses and landslides, but allow reducing possible damage from them, especially risk for the people who are in the open-pit.

Key words: stability of edges; open-pit; benches; parameters of edges; rock jointing; adjacent rock massif; surface of sliding; stability factor of safety; observing station; reference points; monitoring.

REFERENCES

1. Ericsson M., Larsson V. E&MJ's annual survey of global mining investment. *Engineering & Mining Journal*, 2013, vol. 214, no. 1, pp. 28–33.
2. Sashurin A. D., Panzhin A. A. [Mechanism of generation of emergencies of various scales in consequence of modern geodynamic displacements]. *Chernaia metallurgiiā – Ferrous Metallurgy*, 2017, no. 1 (1405), pp. 21–25. (In Russ.)
3. Sashurin A. D., Panzhin A. A., Kharisov T. F., Knyazev D. Yu. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins. *Eurasian Mining*, 2016, no. 2 (26), pp. 3–5.
4. Sashurin A. D., Iakovlev A. V. [Research report “Investigation of engineering-geological conditions of mining and substantiation of limiting angles of inclination of open-pit edges of Kiyembayevsky asbestos mining and processing complex”]. The Institute of Mining UB RAS Publ., Ekaterinburg, 2002. 164 p.
5. Instruction on observation over the edges, benches slopes, and open-pit waste dumps deformations and the development of actions to maintain their stability. Leningrad, VNIMI Publ., 1971. 178 p. (In Russ.)
6. Methodological guidelines over the calculation of stability and bearing capacity of dumps. Leningrad, All-Russian Research Institute of Mining Geomechanics and Survey Publ., 1987. 127 p. (In Russ.)
7. Rules of slopes stabilization at coal mines. St. Petersburg, VNIMI, 1998. 208 p. (In Russ.)
8. Sashurin A. D. [Research report “Investigation of geomechanical conditions, reasons and regularities of JSC Orenburg Minerals open-pit edges destabilization and development of actions on safe mining”]. The Institute of Mining UB RAS Publ., Ekaterinburg, 2017. 188 p.
9. Fisenko G. L. *Ustoichivost' bortov kar'erov i otvalov* [Stability of open-pits' and dumps' edges]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 378 p.
10. Khuan Ia. Kh. *Ustoichivost' zemlianykh otkosov* [Stability of earth walls]. Moscow, Stroiizdat, 1988. 240 p.
11. Fedorovskii V. G., Kurillo S. V. [Calculation method for slopes and inclinations]. *Geoekologiiā. Inzhenernaia geologiiā, gidrogeologiiā, geokriologiiā – Environmental Geoscience*, 1997, no. 6, pp. 95–106. (In Russ.)
12. Fedorovskii V. G., Kurillo S. V. [Method of variable degree of soil resistance mobilization to calculate strength characteristics of soil mass]. *Osnovaniia, fundamenti i mekhanika gruntov – Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1998, no. 4/5, pp. 18–22. (In Russ.)
13. Tsirel' S. V., Pavlovich A. A. [Problems and development paths of the methods of geomechanical substantiation of open-pit edges parameters]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2017, no. 7, pp. 39–45. (In Russ.)
14. Kocharian G. G., Spivak A. A. [Hierarchy of structural and geodynamic characteristics of earth crust]. *Geoekologiiā. Inzhenernaia geologiiā, gidrogeologiiā, geokriologiiā – Environmental Geoscience*, 2002, no. 6, pp. 537–550. (In Russ.)
15. Lukk A. A., Deshcherevskii A. V., Sidorin I. Ia., Sidorin I. A. [Variations of geophysical fields as the manifestation of determined chaos in fractal environment]. Moscow, IPE RAS Publ., 1996. 200 p.
16. Zheltyshva O. D., Efremov E. Iu. [Modern technologies of open-pits edges stability monitoring]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie – Mine Surveying and Subsurface Use*, 2014, no. 5 (73), pp. 63–66. (In Russ.)
17. Panzhin A. A., Sashurin A. D., Panzhina N. A. [Geodynamic monitoring at Uzelginsky deposit]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie – Mine Surveying and Subsurface Use*, 2016, vol. 1, no. 3 (83), pp. 30–35. (In Russ.)
18. Methodological guidelines on observations over the deformations of open-pits and dumps edges, interpretation of their results, and stability forecast. Leningrad, All-Russian Research Institute of Mining Geomechanics and Survey Publ., 1987. 118 p. (In Russ.)