

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ КИЕМБАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

ЕФРЕМОВ Е. Ю., ПАНЖИН А. А., ХАРИСОВ Т. Ф., ХАРИСОВА О. Д.

*Разработка Киембаевского месторождения сопровождается локальными обрушениями, несмотря на предусмотренные проектом меры безопасности. Наибольший ущерб нанесло обрушение на западном борту карьера, оно занимает участок 250 м по простиранию и 70 м по высоте. Проведенные исследования, включающие анализ маркшейдерских данных, геологических материалов и данных трехмерного моделирования, определили причины обрушения западного борта Киембаевского карьера. Основные факторы, влияющие на устойчивость борта – крупные тектонические нарушения, имеющие угол падения, направленный на выработанное пространство, и напряженно-деформированное состояние массива. Проведенные геодезические измерения установили параметры распределения напряженно-деформированного состояния. Разбор материалов предыдущих исследований позволил проанализировать структурное строение массива. Анализ распределения негативных факторов помог выделить потенциально опасные участки карьера.*

**Ключевые слова:** *устойчивость бортов карьера; напряженно-деформированное состояние; тектонические нарушения; трещиноватость; наблюдательная станция; тензор деформации.*

Киембаевское месторождение хризотил-асбеста разрабатывается в соответствии с установленными проектными решениями. Однако ведение горных работ сопровождается деформационными явлениями разного масштаба, нарушающими нормальную эксплуатацию карьера. Самое масштабное такое явление произошло в апреле 2017 года. Обрушился участок западного борта размерами более 250 м по простиранию. Обрушение затронуло несколько горизонтов, от отметки 240 до 310 м.

Сложившаяся ситуация создала угрозу безопасной эксплуатации железнодорожных путей, расположенных на транспортной берме горизонта 310 м, являющихся главной транспортной артерией карьера.

Классические расчеты устойчивости борта карьера (*Оценка устойчивости бортов карьера ОАО «Оренбургские минералы» и разработка рекомендаций по установлению допустимых углов погашения нерабочих бортов карьера на конце*

---

**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

**Панжин Андрей Алексеевич** – кандидат технических наук, ученый секретарь. 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Институт горного дела УрО РАН. E-mail: panzhin@igduran.ru

**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: olgazeltyshva@gmail.com

его отработки: отчет о НИР / ВНИМИ; отв. исп. Тресцов Н. Н. Екатеринбург, 2015. 85 с.) для этого участка показали, что он устойчив, коэффициент запаса устойчивости равен 1,58, а угол откоса борта близок к углу естественного откоса для данных пород, однако борт продолжает деформироваться. Для организации нормальной эксплуатации карьера необходимо установить причины опасных деформационных процессов на карьере и определить потенциально опасные, с точки зрения деформационных явлений, участки карьера, что и является целью настоящей работы.

Методика работы содержит следующее:

- изучение произошедшего обрушения; выявление механизма обрушения и основных негативных факторов, способствовавших потере устойчивости западного борта;

- исследование пространства карьера, определение потенциально опасных участков карьера на основе распределения определенных негативных факторов.

Для изучения обрушения и определения причин произошедшего события были привлечены геологические данные, материалы предыдущих научно-исследовательских работ, визуальный осмотр, маркшейдерские измерения, а также съемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).



Рис. 1. Наблюдательная станция, гор. 310 м

Опасная зона состоит из двух участков деформирования, развивавшихся по отдельности. Угрозу транспортному сообщению карьера создал северный участок опасной зоны. Для наблюдения за развитием процесса деформирования работниками маркшейдерской службы предприятия была организована наблюдательная станция (рис. 1).

Наблюдения за северным участком производились силами маркшейдерского отдела методом тригонометрического нивелирования с периодом 2–9 суток. На рис. 2 представлен график оседания реперов наблюдательной станции северного участка. При внимательном рассмотрении графика можно заметить, что от серии к серии реперы двигаются согласованно, наиболее заметно это начиная с 26 дня наблюдений, один из самых заметных циклов приходится на 46–67 суток наблюдения с максимальными поднятиями на 55-е сутки наблюдений. Вероятно, это влияние изменения высоты прибора во время измерений или иного фактора, независимого от сдвижения.

Из графика видно, что из согласованного сдвижения реперов выделяются Rp2 и Rp11. Сдвижение Rp2 независимо от остального массива с начала наблюдений, в то время как сдвижение Rp11 стало независимым начиная с 57 дня наблюдений. Наиболее значимые оседания к 69 дню наблюдений имеет Rp2, его смещения достигают 40 мм, смещения Rp11 достигают 5 мм, и это число не так велико, однако на фоне других реперов, имеющих к 69 суткам наблюдения поднятия от 1 до 8 мм, это существенная величина.

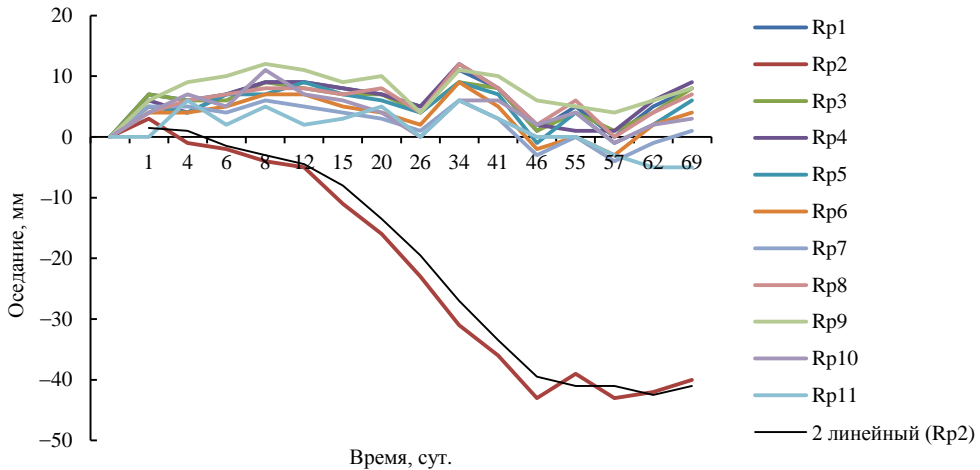


Рис. 2. Оседание северного участка зоны обрушения

Таким образом, из рассмотрения маркшейдерских наблюдений ясно, что массив борта вокруг зоны обрушения стабилен. В процесс оседания под собственным весом вовлечены лишь локальные участки.

Из исследований ИГД УрО РАН, выполненных в 2002 году, видно, что строение западного борта по сравнению с восточным характеризуется большей степенью метасоматизма, что сопровождается интенсивной микротрещиноватостью, более широким раскрытием крупных трещин, низкими физико-механическими свойствами пород, слагающих массив (*Исследование инженерно-геологических условий разработки и обоснование предельных углов наклона бортов карьера Кимбаевского асбестового ГОКа: отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. Сашури А. Д., Яковлев А. В. Екатеринбург, 2002. 164 с.*). Так, только на западном борту встречаются образцы с пределом прочности при сжатии 39,1 МПа и при растяжении 9,23 МПа, в то время как средние значения по карьере составляют 80–120 МПа и 7–12 МПа соответственно.

Отмечается наличие тектонических нарушений с заполнителем, имеющим низкие физико-механические свойства (брусит, тальк, гематит, которые являются водонасыщенными). Также отмечается, что ориентировка азимутов и углов падения тектонических нарушений варьируется в широких пределах, так что отдельные нарушения могут образовывать породные клинья, устойчивость которых может быть значительно ниже окружающего массива.

Трехмерная модель обрушения, полученная с помощью фотограмметрии, представлена на рис. 3.

Из рассмотрения модели и наблюдений на месте обрушения установлено, что произошедшее деформационное событие не является оползнем с классической поверхностью скольжения, близкой к цилиндрической. Основная часть северного участка представляет собой поверхность скольжения, являющуюся крупной тектонической дислокацией, имеющей угол падения  $34^{\circ}$ – $37^{\circ}$ , направленный в карьер.

Таким образом, данное деформационное явление – обрушение, реализовавшееся в результате потери устойчивости породного клина, отделенного от остального прибортового массива пересечением крупных тектонических дислокаций.

Основными факторами, влияющими на потерю устойчивости, являются:

- негативное напряженно-деформированное состояние (НДС);
- негативное сочетание структурных элементов строения массива.

Под негативным сочетанием структурных элементов массива понимается наличие тектонического нарушения высокого ранга (неоднородность II порядка, макротрещиноватость в пределах одного массива [1]), имеющего угол падения, направленный в карьер, или пересечение двух аналогичных систем тектонических нарушений с образованием породных клиньев.



Рис. 3. Трехмерная модель северного участка зоны обрушения

Под негативным НДС подразумеваются следующие возможные проявления: большие относительные деформации в сторону выработанного пространства, современные геодинамические движения и сочетание тензора напряжений в данной точке, при котором сжатие по одной из главных осей сопровождается растяжением по другой.

Наличие этих двух факторов становится необходимым условием реализации обрушения. Также оказывают влияние заполнитель нарушений, обводненность и другие факторы, но основными являются упомянутые выше.

Для анализа пространства карьера использовались данные, предоставленные геологической службой, материалы предыдущих исследований ИГД УрО РАН, посвященные исследованию структурных особенностей карьера, а также данные о НДС массива, полученные из измерения сдвижения массива горных пород. Сдвижение пород определялось с помощью практикующихся в ИГД УрО РАН спутниковых геодезических методов [2–5]. Изменение НДС массива определялось из сдвижения массива вокруг выработанного пространства, реализовавшегося за период 2006–2017 гг. Измерения проводились на геодинамическом полигоне, состоящем из пунктов государственной геодезической сети (ГГС), удаленных от выработанного пространства на 2–8 км, и пунктов опорной межевой сети (ОМС) карьера, располагающихся непосредственно на борту карьера и на прилегающей территории (рис. 4). Измерения обеих серий проводились 2-частотными ГНСС приемниками с паспортной точностью  $3+0,5$  мм/км.

Центрирование и ориентирование геодезических построений в пространстве осуществлялось с использованием условия равновесия по методу наименьших

квадратов (МНК). В ориентировании участвовали наиболее удаленные от карьера пункты ГГС. Сдвижение пунктов геодезического полигона приведено в таблице.

Средняя величина вектора сдвижения в горизонтальной плоскости пунктов, удаленных от влияния горных работ, составляет 17 мм. За этот же период времени средняя величина вектора сдвижения пунктов ОМС на борту карьера составляет 68 мм, превышая аналогичную характеристику удаленных пунктов в 4 раза. Векторы смещений ориентированы в сторону выработанного пространства под воздействием сил, стремящихся восстановить равновесие, нарушенное возмущающей полостью карьера.

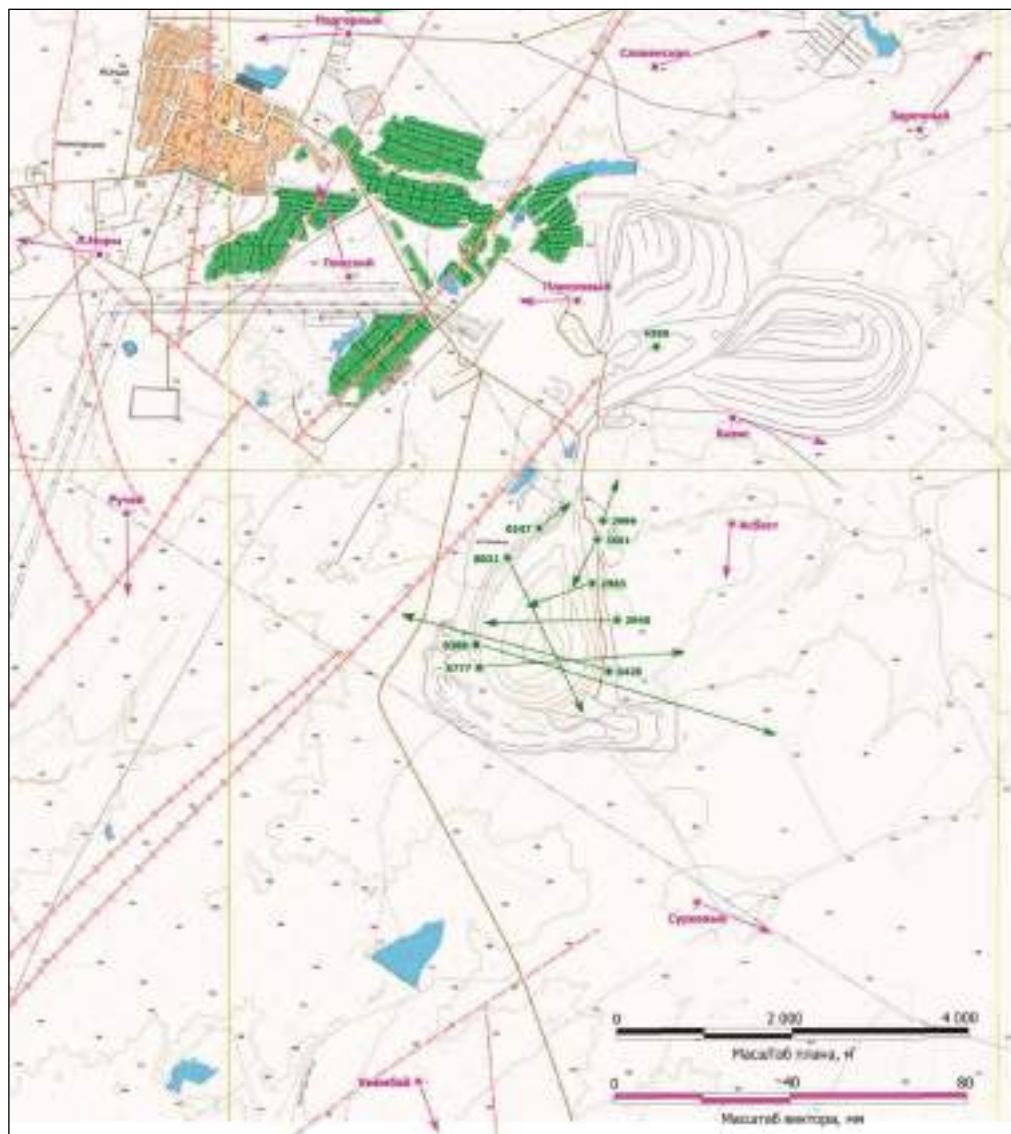


Рис. 4. Векторы сдвижений пунктов ГГС и ОМС. Период 2006–2017 гг. Составил А. А. Панжин, 2017 г.

В силу неоднородного структурного строения массива, анизотропного поля естественного НДС, порядка отработки месторождения направление векторов смещения не всегда обращено в центр выработанного пространства, а колеблется в некоторых рамках, в силу этих же причин у конкретных пунктов различается

абсолютное значение вектора смещения. Так, абсолютная величина плоского смещения пункта 2001 в горизонтальной плоскости больше аналогичной характеристики пункта 3561 в 2,3 раза (таблица). Неоднородность геодинамических движений в сочетании с блочностью структуры и геометрическими параметрами карьера приводит к формированию в его бортах зон концентрации поля деформаций и напряжений (рис. 5).

Сдвигение пунктов геодинамического полигона

Репер	Приращения координат, мм 2006 (2007)–2017					Репер	Приращения координат, мм 2006 (2007)–2017				
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta H$	$2D$	$3D$		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta H$	$2D$	$3D$
Ручей	-17	0	21	17	27	pp-8021	-34	16	68	37	78
Славенский	7	24	19	26	32	pp-8388	-20	66	1	69	69
Сурковский	-6	15	-19	16	25	pp-2000	6	-17	-31	18	36
Киембай	-10	4	-9	10	14	pp-2001	-1	-24	40	24	47
Лисья Нора	3	-17	22	17	28	pp-2005	-33	3	9	34	35
Плоский	19	-6	-16	20	25	pp-101	-34	-1	27	34	44
Подгорный	-1	-19	-13	19	23	pp-102	-56	49	-36	75	83
Асбестовый	-10	-1	14	11	17	pp-103	13	13	121	18	123
Базисный	-5	19	113	20	114	pp-104	-2	-32	-5	32	32
Заречный	16	13	66	21	69	pp-105	70	-29	34	76	83
Поисковый	0	-11	49	11	50	pp-106	45	-56	74	72	103
pp-0247	4	6	72	7	72	pp-107	28	-60	19	66	69
pp-0420	12	-45	115	47	124	pp-108	5	-34	73	34	81
pp-2945	-1	-28	112	28	115	Otval-01	81	9	174	81	192
pp-2983	-5	-13	63	14	65	Otval-02	-3	32	113	32	117
pp-2999	7	3	16	8	17	Otval-03	-6	17	138	18	139
pp-3561	-9	-5	28	10	30	Otval-04	12	32	150	34	154
pp-5777	3	45	28	45	53	Otval-05	21	23	85	31	91

Наибольший риск представляют зоны концентраций, в которых сочетаются депрессия по одному из главных направлений с повышенными сжимающими деформациями и напряжениями по второму главному направлению. На этих участках за счет депрессии образуются разуплотненные массы горных пород, раскрываются трещины, что в сочетании с повышенными сжимающими силами по второму направлению приводит к образованию сдвиговых деформаций и формированию обрушений. Подобные области со специфичным напряженно-деформированным состоянием сформировались на северо-западном, северо-восточном и – небольшие – на южном бортах карьера (рис. 6).

В соответствии с установленными условиями механизм образования обрушений следующий. Массив перманентно находится под действием равнодействующей силы, направленной, как правило, в сторону выработанного пространства. При приложении этой силы в области пересечения тектонических нарушений, особенно если одно из них имеет угол падения в сторону выработанного пространства, сопротивление сдвигу на данном участке массива может оказаться меньше равнодействующей. В этом случае клин, образованный пересекающимися плоскостями нарушений, теряет равновесие и, утрачивая связь с основным массивом, под действием силы тяжести начинает движение. Важным условием реализации негативного сценария является близость пересечения нарушений достаточно высокого ранга к дневной поверхности карьера.



Обрушение – это вероятностный процесс, невозможно однозначно спрогнозировать будущую аварию, можно лишь судить о повышении или понижении вероятности или степени риска в зависимости от наличия негативных факторов. С целью определения потенциально опасных участков все пространство карьера проанализировано с точки зрения факторов, сочетание которых может привести к реализации обрушения.

К значимым негативным факторам, выявленным в ходе исследования, относятся:

- депрессионные зоны и области концентрации сжимающих напряжений и деформаций в массиве горных пород [6, 7];
- негативное сочетание структурных элементов массива;
- степень раскрытия структурных нарушений и низкие прочностные свойства заполнителя;
- обводненность пород в зонах тектонических нарушений.

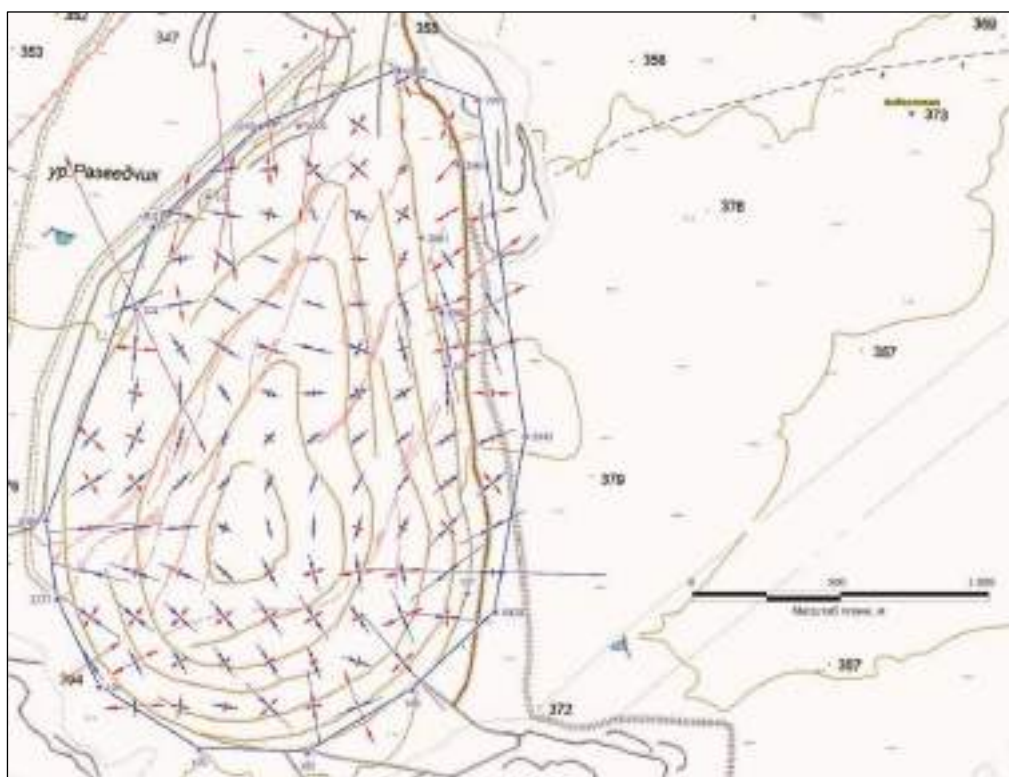


Рис. 6. Тензоры деформаций массива пород Киембаевского карьера. Период 2006–2017 гг. Составил А. А. Панжин, 2017 г.

На первом этапе анализа выделяются все участки карьера, на которых присутствуют негативные факторы. Анализ каждого из факторов производится независимо от других. При обнаружении негативного фактора определяется размер области, на которой его влияние существенно. Данная область оконтуривается.

На рис. 5 приведены тензоры деформаций породного массива. На основании сочетания концентраций и депрессий поля напряжений выделены области, внутри которых за период с 2006 по 2017 гг. перемещения массива являются одним из факторов формирования потенциально опасных участков. Из рисунка видно, что эти участки в основном располагаются в северной части карьера. Выделены области, определенные на основе анализа структурного строения массива по дан-



ным материалов геологической службы и исследований ВНИМИ трещиноватости, обводненности и геофизических исследований (*Оценка устойчивости бортов карьера ОАО «Оренбургские минералы» и разработка рекомендаций по установлению допустимых углов погашения нерабочих бортов карьера на конце его отработки: отчет о НИР / ВНИМИ; отв. исп. Тресцов Н. Н. Екатеринбург, 2015. 85 с.*).

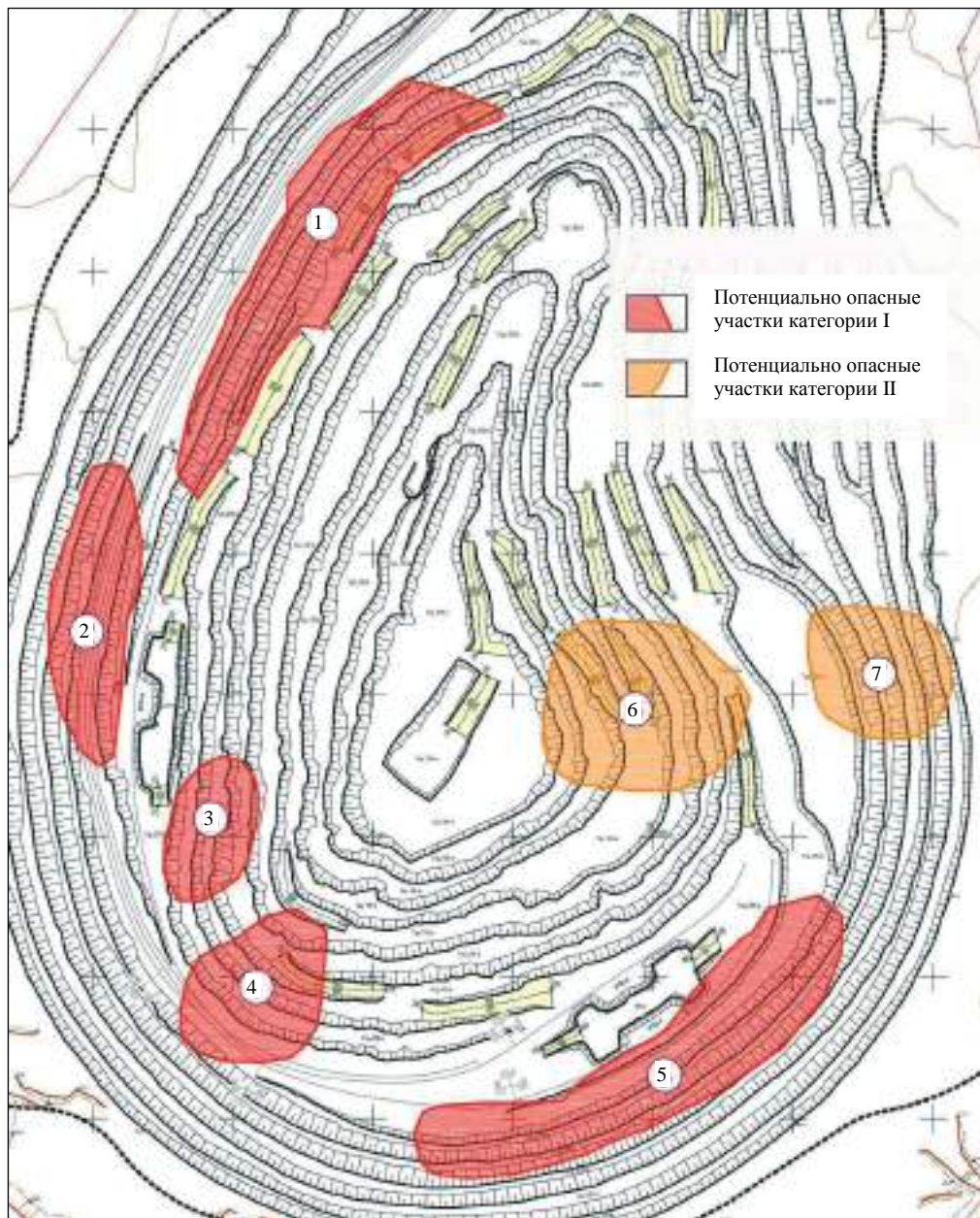


Рис. 7. Потенциально опасные участки Кийембаевского карьера

На втором этапе проводится оценка степени риска разрушительных деформационных процессов на основании количества выявленных негативных факторов на данном участке. Соответственно, большее количество негативных факторов,

присущих участку, означает большую вероятность разрушительных деформационных процессов. Выделенные участки разделены на категории в зависимости от комбинации действующих на них негативных факторов.

Первая категория включает участки, на которых проявляется влияние не менее трех факторов, среди которых определяющее значение имеет близость разнонаправленных структурных нарушений, повышенные и пониженные концентрации напряжений. Их совокупность говорит о более высокой вероятности аварийных событий.

Вторая категория включает участки с двумя действующими факторами, среди которых негативное сочетание структурных элементов массива и обводненность. Два этих фактора представляют определенную опасность, однако меньшую по сравнению с первой категорией.

Необходимо отметить, что на западном и южном бортах карьера трещины имеют большее раскрытие и заполнитель с худшими физико-механическими характеристиками. В связи с этим вероятность опасности возникновения обрушений возрастает, что отражается в оценке участка.

Из рис. 7 видно, что всего на карьере выделено 7 потенциально опасных участков, среди них 5 участков категории I и 2 участка категории II. С горно-технологической точки зрения обнаруженные потенциально опасные участки делятся на две группы в зависимости от расположения и присутствия на их территории важных технологических объектов инфраструктуры карьера (железнодорожных тупиков, автомобильных дорог и пр.):

– участки, располагающиеся в рабочей зоне, в область которых не попадают важные технологические элементы инфраструктуры (участки № 3, 6, 7);

– располагающиеся на проектной контуре и(или) в область которых попадают важные объекты инфраструктуры (участки № 1, 2, 4, 5).

Для безопасной эксплуатации карьера на потенциально опасных участках рекомендуется комплекс мероприятий по обеспечению устойчивости, включающий выполаживание угла откоса, особый порядок отработки, щадящие технологии взрывания и др. Данные мероприятия способствуют минимизации рисков появления аварийных ситуаций [8].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефремов Е. Ю., Желтышева О. Д. Метод определения напряжений на протяженных участках массива горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 7. С. 34 – 39.
2. Панжин А. А., Сашурин А. Д., Боликов В. Е., Ручкин В. И., Ефремов Е. Ю., Панжина Н. А. Особенности проведения геодинамического мониторинга на Узельгинском месторождении // Проблемы недропользования. 2014. № 4. С. 81–89.
3. Сашурин А. Д., Балек А. Е. Совершенствование методики натуральных замеров напряженно-деформированного состояния больших участков горного массива // Вестник ПНИПУ. Геология и нефтегазовое дело. 2014. № 11. С. 105–120.
4. Балек А. Е., Ефремов Е. Ю. Обоснование геомеханических условий подземной разработки алмазного месторождения «трубка Удачная» // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 39–45.
5. Пустуев А. Л., Коновалова Ю. П., Мартемьянов А. А. Принципы построения геодинамических полигонов при масштабном недропользовании // Горный журнал. 2012. № 1. С. 31–36.
6. Сашурин А. Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород // Проблемы недропользования. 2015. № 1. С. 38–44.
7. Ручкин В. И., Коновалова Ю. П. Зависимость динамики напряженно-деформированного состояния геологической среды от техногенного воздействия на естественное тектоническое состояние массива горных пород на горнодобывающих предприятиях // ГИАБ. 2016. № 1. С. 250–259.
8. Балек А. Е. Управление напряженно-деформированным состоянием скального массива путем регулируемых подвижек консолидированных геоблоков // ГИАБ. 2005. № 6. С. 164–170.

Поступила в редакцию 24 января 2018 года

#### RESEARCH OF GEOMECHANICAL CONDITIONS OF KIEMBAEV OPEN PIT OPENCAST MINING

Efremov E. Yu., Panzhin A. A., Kharisov T. F., Kharisova O. D. – The Institute of Mining, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: efremov-eu@mail.ru

Open pit mining of Kiimbaev deposit is accompanied by local edge failure despite safety measures provided by the project. The greatest damage was caused by a rockslide of the western edge of the pit. It is 250 meters wide and 70 meters high. Research, including the analysis of mine survey data, geological materials and 3D modeling data determined the causes for the failure of the western edge of Kiimbaev open pit. The main factors affecting the stability of the edge are large tectonic faults having a dip angle focused on the mined-out area, and a stress-strain state of the rock mass. The geodetic measurements determined the parameters of the stress-strain state location. Analysis of materials from previous researches made it possible to analyze the structure of the rock mass. Negative factors location analysis helped to determine potentially dangerous areas of the open pit.

**Key words:** pit edge stability; stress-strain state; tectonic faults; rock jointing; survey station; strain tensor.

#### REFERENCES

1. Efremov E. Yu., Zhelytsheva O. D. [Method for determining the stress throughout the stretches of rock mass]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 7, pp. 34–39. (In Russ.)
2. Panzhin A. A., Sashurin A. D., Bolikov V. E., Ruchkin V. I., Efremov E. Iu., Panzhina N. A. [Peculiarities of geodynamic monitoring at Uzelginsky deposit]. *Problemy nedropol'zovaniia – The Problems of Subsoil Use*, 2014, no. 4, pp. 81–89. (In Russ.)
3. Sashurin A. D., Balek A. E. [Developing the methods of field measurements of stress-strain state of large sections of a rock mass]. *Vestnik PNIPU. Geologiya i neftegazovoe delo – Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2014, no. 11, pp. 105–120. (In Russ.)
4. Balek A. E., Efremov E. Iu. [The substantiation of geomechanical conditions of “Udachnaya pipe” diamond deposit underground mining]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 5, pp. 39–45. (In Russ.)
5. Pustuev A. L., Konovalova Iu. P., Martem'ianov A. A. [The principles of building geodynamic polygons through large-scale subsoil use]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2012, no. 1, pp. 31–36. (In Russ.)
6. Sashurin A. D. [Development of stress-strain state of hierarchical blocky rock mass]. *Problemy nedropol'zovaniia – The Problems of Subsoil Use*, 2015, no. 1, pp. 38–44.
7. Ruchkin V. I., Konovalova Iu. P. [The dependence of the dynamics of the stress-strained state of geological environment on the technogenic impact on the natural tectonic state of rock mass at mining enterprises]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2016, no. 1, pp. 250–259. (In Russ.)
8. Balek A. E. [Control over the stress-strain state of hard rock mass by regulated movements of consolidated geoblocks]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2005, no. 6, pp. 164–170. (In Russ.)