

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВ КАРЬЕРОВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ

В.И. Спирин, И.С. Ливинский, Э. Хормазабаль,

Представлен подход к оценке рисков на основе вероятностного анализа устойчивости карьерных откосов различного масштаба

Ключевые слова: риск, вероятность обрушения, последствия, масштаб откосов, неопределенность данных, эффективная ширина бермы, анализ чувствительности, вероятностный анализ, матрица рисков

Введение

Любое нарушение устойчивости в карьере должно быть контролируемым в разных масштабных уровнях - уступы, группы уступов между транспортными съездами, борт карьера в целом, так как это влияет на технологические процессы, экономическую эффективность предприятия и безопасность труда. Для прогнозирования потенциальных деформаций проектных параметров карьерных откосов, обоснованных геомеханическими исследованиями, вводится понятие риска. По результатам анализа рисков и сопоставления их с приемлемыми значениями разрабатываются мероприятия по предотвращению или снижению его последствий.

Риск возникновения деформаций откосов возникает из-за недоизученности и высокой неоднородности факторов, учитываемых при обосновании устойчивости откосов: природная изменчивость геологических и тектонических структур, геомеханические характеристики породного массива и поверхностей ослабления, гидрогеологические условия, а также допущения, присутствующие в расчетных методах и моделях.

При классическом детерминированном подходе к оценке устойчивости откосов, неопределенность прочностных свойств отчасти компенсируется нормативным (проектным) коэффициентом запаса устойчивости. Другие случайные факторы и допущения при этом не учитываются.

Количественная оценка риска основывается на вероятностном подходе [1], который может применяться как дополнительный к детерминированному, для учета влияния изменчивости факторов на любом этапе проектирования карьера. Вероятность обрушения откоса может определяться несколькими методами - путем многократного определения его запаса устойчивости при различных исходных параметрах, выбираемых методом Монте-Карло в диапазоне варьирования значений, методом Точечного определения (Point Estimate Methods), а также его частные случаи - методы Чувствительного фактора (Response influence factor method),

Поверхностного Отклика (Response surface method) и др [2]. По результатам многовариантных расчетов вероятность обрушения откоса (PoF) определяется долей результатов расчета с коэффициентом запаса (FoS) меньше 1 ко всему объему расчетов (Рис. 1):

$$PoF = P[FoS \leq 1], \%$$

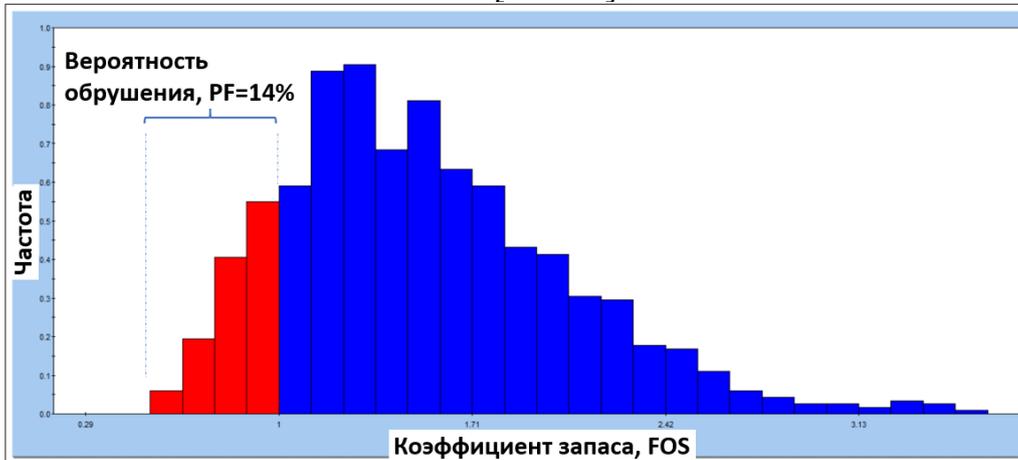


Рис. 1. Вероятность обрушения

Более высокий расчетный коэффициент запаса устойчивости (FS) не во всех случаях отражает более благоприятную ситуацию. На рис. 2 представлены два случая определения устойчивости откосов со средними коэффициентами запаса $FS(a)$ и $FS(b)$, где коэффициент запаса для откоса (b) выше - $FS(a) < FS(b)$. Однако, ввиду высокой неопределенности исходных данных вероятность разрушения откоса (b) выше $PF(a) < PF(b)$, что характеризуют заштрихованные области (синим- $PF(a)$ и красным- $PF(b)$). Это означает, что случай (b) более рискованный, хотя и с большим коэффициентом запаса.

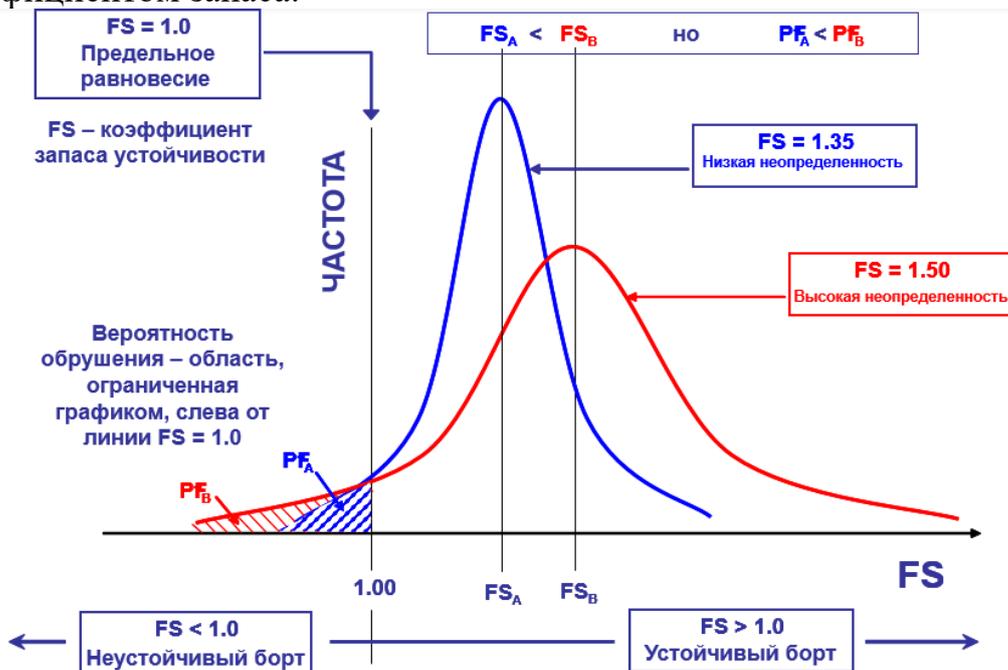


Рис. 2. Влияние неопределенности исходных данных на вероятность обрушения [3]

Вероятностный анализ устойчивости проводится отдельно для различных масштабов откосов – уступы, группы уступов и борта.

Вероятностный анализ устойчивости в масштабе уступов

Устойчивость уступов в скальных и полускальных массивах в большей степени зависит от параметров поверхностей ослаблений, которые образуют блоки потенциальных вывалов (рис. 3).

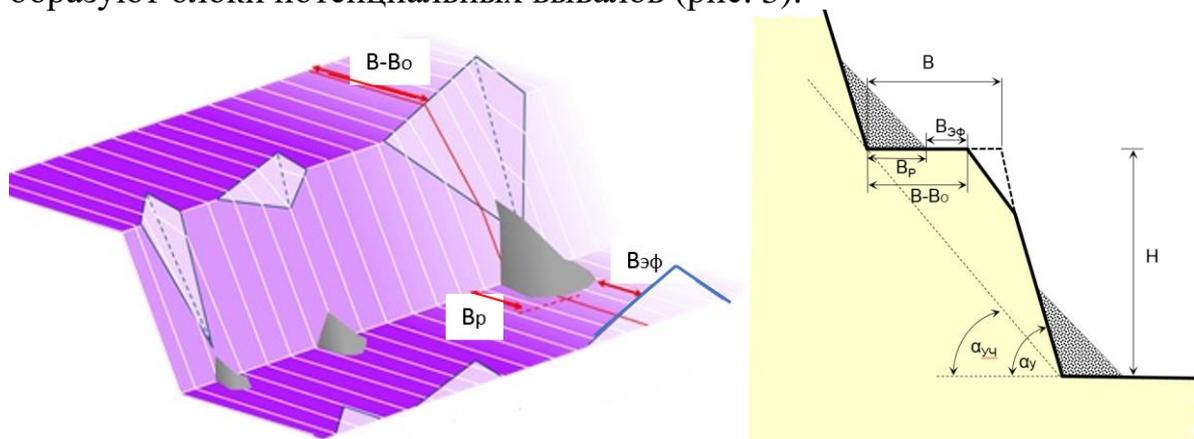


Рис. 3. Схема вывалов с уступов [4]

Проектная ширина предохранительной бермы (B , м) может определяться с учетом величины ее сработки (осыпи или вывалы) (B_o , м), ширины (радиуса) развала осыпи (B_p , м) и необходимой эффективной ширины бермы ($B_{эф}$, м), которая задается из необходимости проезда по берме горной техники и может также компенсировать влияние процессов выветривания при длительном сроке стояния уступа. Эффективная ширина бермы ($B_{эф}$) - это оставшаяся часть бермы после сработки осыпью и развала обрушенных пород с вышележащего горизонта.

Проектная ширина предохранительной бермы при таком подходе определяется как:

$$B \geq B_o + B_p + B_{эф}, \text{ м.}$$

Вероятностные расчеты устойчивости уступов эксплуатируемых карьеров начинаются с калибровки исходных данных о трещиноватости массива по фактам произошедших вывалов. По форме и масштабам вывалов на реальных откосах калибруются средние значения расстояний между трещинами и их протяженности, а также их вариация [4-7] (рис. 5). Для получения прочностных характеристик трещин (сцепление и угол трения по ним) выполняются обратные расчеты по произошедшим вывалам [8].

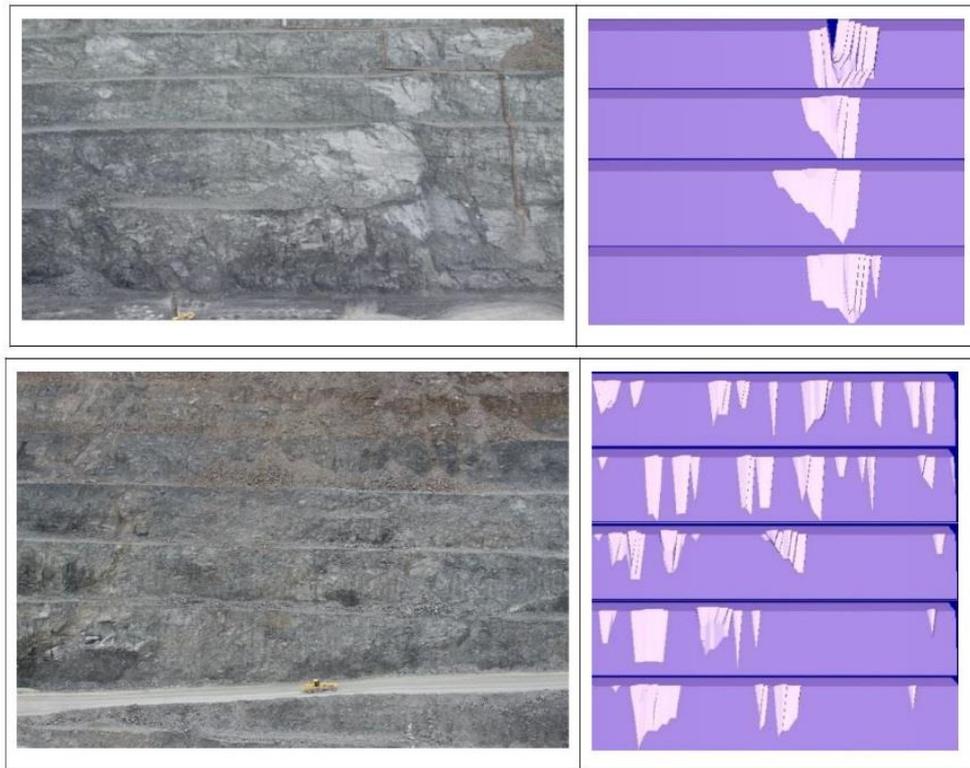


Рис. 5. Примеры калибровки моделей обрушений уступов

Полностью исключить вывалы с уступов практически невозможно. Поэтому, оптимизация их параметров основывается на подборе такого угла наклона уступа, при котором вероятность обрушений (вывалов) не превышает заданный уровень (приемлемый критерий), а ширина бермы должна обеспечить улавливание всего объема возможных вывалов.

В табл. 1 приведен пример расчета и выбора оптимальных параметров уступов и берм для локального участка.

Таблица 1

Выбор оптимальных параметров уступов и берм

№ Анализа	Азимут падения откоса уступа	Уступы				Сработка бермы			Вероятность обрушения, PF %	Средний объем вывала, м ² /м
		Высота уступа, Н, (м)	Угол наклона, α , °	Ширина бермы, В (м)	Угол между группой уступов, $\alpha_{гч}$, °	Средняя после обрушения верхней бермы, В-Во (м)	Средняя требуемая для удержания вывала, Вр (м)	Средняя эффективная после обрушения и навала, Вэф, (м)		
D01_W_20_70_30_12	20.0	30.0	70.0	12.0	52.6	11.5	7.4	4.1	17.8%	13.2
D01_W_60_70_30_12	60.0	30.0	70.0	12.0	52.6	11.3	7.5	3.8	23.2%	13.8
D01_W_80_70_30_12	80.0	30.0	70.0	12.0	52.6	11.0	8.9	2.1	23.1%	19.4
D01_W_80_75_30_12	80.0	30.0	75.0	12.0	56.3	10.5	10.7	-0.2	30.5%	26.2
D01_W_80_75_30_16	80.0	30.0	75.0	16.0	51.3	14.4	12.0	2.4	30.6%	32.7

В данном примере, для рассматриваемого домена $D01W$ (участка борта, с углом $\alpha_{уч}$) приняты параметры откоса высотой $H=30м.$, углом откоса $\alpha_{у}=70^{\circ}$ и шириной бермы $B=12м.$, при которых обеспечиваются принятые критерии по вероятности обрушения $PF \leq 25\%$ и эффективной ширине бермы $B_{эф} \geq 2$ (применительно для данного конкретного примера).

Вероятностный анализ устойчивости в масштабе групп уступов

Вероятностный анализ устойчивости групп уступов, с оценкой риска образования макродеформаций, зависит от крупных структур (разломов), наличия слабых породных слоев, их ориентировок и прочностных характеристик контактов, физико-механических свойств породного массива и гидрогеологических условий анализируемого участка. Примеры макродеформаций масштаба группы уступов представлены на рис. 5.

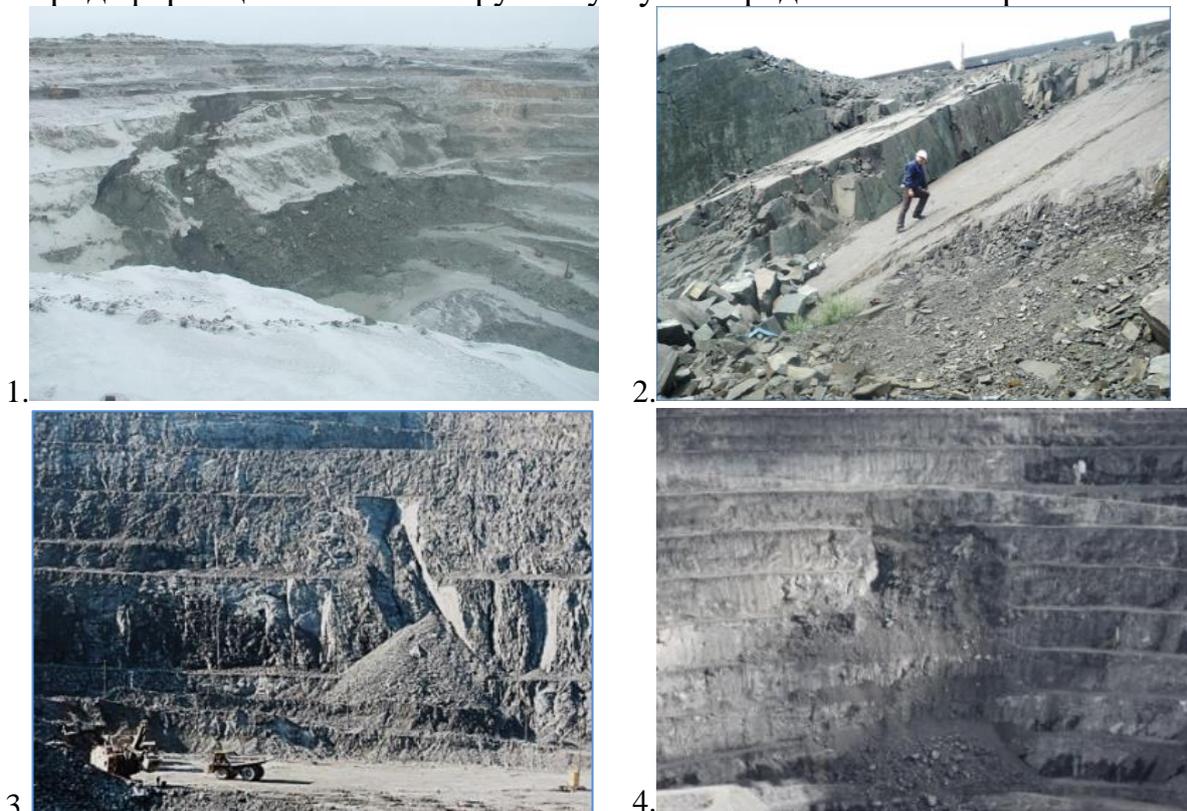


Рис. 5. Примеры макродеформаций: 1- деформация оползневого типа; 2- плоская деформация; 3- клиновидная деформация; 4- деформация опрокидывания

Для проведения расчетов устойчивости в масштабе групп уступов применяется как метод предельного равновесия, при котором рассматривается призма потенциального обрушения, ограниченная сочетаниями крупных разломов и трещин с оценкой сдвигающих и удерживающих сил, так и используются численные методы, при которых поиск и оценка наиболее напряженной поверхности выполняется автоматически.

В качестве примера, представлено районирование карьера по степени геомеханических опасностей, на основе анализа устойчивости макроблоков потенциального обрушения групп уступов. В данном примере в масштабе групп уступов учитывалась только вариативность поверхностей ослабления, как ключевой фактор, влияющий на устойчивость в породах с высокой прочностью. Для расчетов была использована структурная модель месторождения (рис. 6), где также показаны линии пересечения разломов с анализируемым контуром карьера [9].

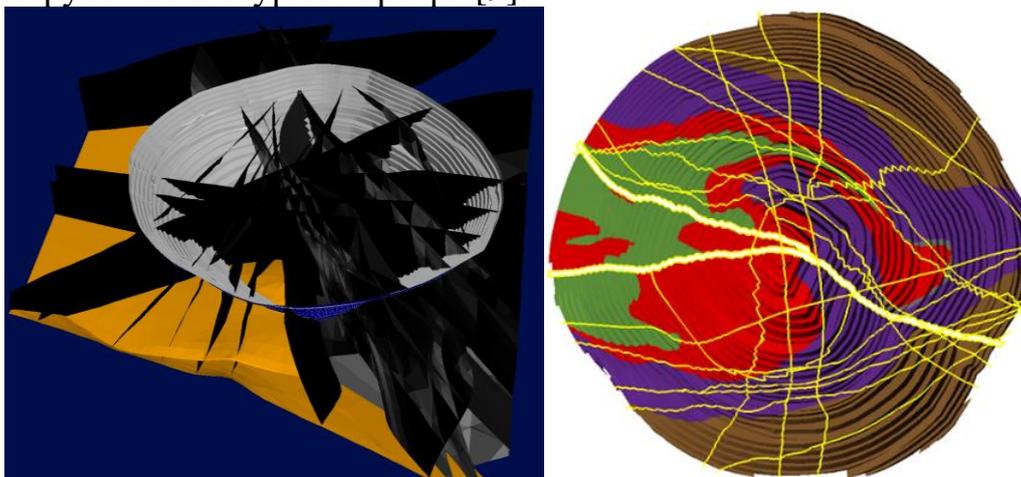


Рис. 6. Структурная модель месторождения и линии пересечения разломов с анализируемым контуром карьера

По результатам анализа устойчивости всех возможных макроблоков потенциального обрушения, в поле проектного контура карьера выделены участки с малым, средним и высоким уровнем потенциального риска (рис. 7). Данная карта с результатами районирования учитывается при организации мониторинга и стабилизирующих мероприятий для участков с разной категорией рисков.

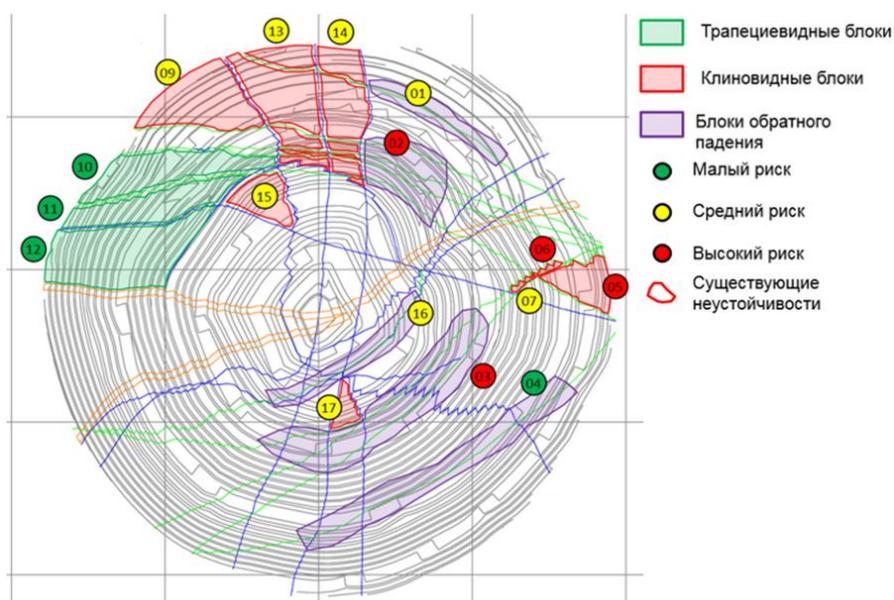


Рис. 7. Районирование карьера по уровню геомеханических опасностей

Вероятностный анализ устойчивости в масштабе борта

Вероятностный анализ на всю высоту борта карьера также зависит от многих геомеханических факторов, однако последствия при возможных деформациях откосов этого масштаба, как правило, больше, чем для группы уступов. Расчет вероятности обрушения борта выполняется по наиболее значимым профилям [10], которые характеризуются наименьшими значениями коэффициентов запаса устойчивости бортов, определенными на этапе детерминированных расчетов устойчивости, бортами с большой высотой, наличием произошедших деформаций, крупных структур, а также, если предполагаются сложные режимы деформаций.

В примере ниже – рис. 8, показан результат детерминированного и вероятностного анализа устойчивости борта карьера по наиболее неблагоприятному расчетному профилю.

Для данного борта, в связи с его неустойчивостью (рис. 8.1), было рекомендовано выполаживание и дренажные мероприятия. После проведения расчетов скорректированного откоса получены допустимые значения критериев безопасности (рис. 8.2): коэффициент запаса составил $FS=1.46$ и вероятность обрушения $PF=6.1\%$.

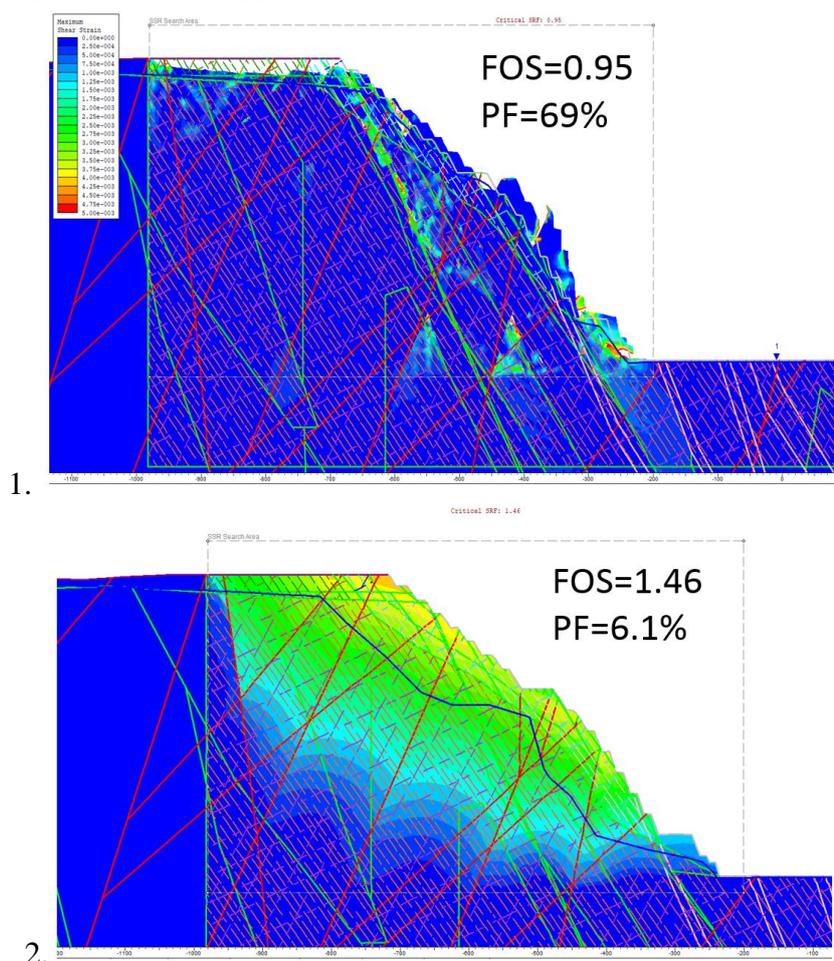


Рис. 8. Вероятностный анализ устойчивости борта: 1 – исходный профиль борта; 2 – скорректированный профиль борта

Перед проведением расчетов, было выделено четыре геомеханических блока исходных данных, для которых задавались неопределенные переменные и в процессе расчетов устойчивости проводился анализ чувствительности данных факторов: группа 1 - все геомеханические разности, кроме выветрелых пород (прочность на одноосное сжатие (UCS), индекс породного массива (GSI)); группа 2 - литологические разности выветрелых пород (прочность на одноосное сжатие (UCS), индекс породного массива (GSI)); группа 3: Крупные структуры и трещины: сцепление, угол внутреннего трения по поверхностям ослабления (c, φ); группа 4: Уровень подземных вод в прибортовом массиве (WT) и возможное отклонение уровня от прогнозируемого положения.

В результате детерминированного и вероятностного анализа получены результаты расчетов с описанием механизма деформирования и наиболее влияющих на устойчивость факторов (табл. 2).

Таблица 2

Результаты вероятностного анализа устойчивости бортов

Сектор (расчетный профиль)	Оцениваемый контур карьера	Масштаб деформации		Результаты расчета устойчивости		Механизм деформирования	Наиболее влияющие группы факторов (в порядке уменьшения)
		Описание	Высота, м	FS	PF		
6	Проектный	Весь борт	230	0.95	69%	<ul style="list-style-type: none"> - Множество крупных структур (разломов, преимущественно обратного падения) в сочетании с неблагоприятно ориентированными системами трещин создают очень блочный массив с превышением сдвиговой прочности массива. - В прибортовой части массива происходит скольжение блоков по плоскостям слоистости (Sliding) - Большое влияние воды на устойчивость борта 	Группы 4, 3, 1

Сектор (расчетный профиль)	Оцениваемый контур карьера	Масштаб деформации		Результаты расчета устойчивости		Механизм деформирования	Наиболее влияющие группы факторов (в порядке уменьшения)
		Описание	Высота, м	FS	PF		
Проектный - скорректированный	Весь борт	230	1.46	6.1%	Снижение обводненности откоса понижает поровое давление в трещинах, что совместно с корректировкой угла приводит к стабилизации откоса.	Группы 1, 3, 4	

Критерии приемлемости

При оценке устойчивости откосов, для различных масштабов откосов (уступ, группа уступов и борт) применяются различные критерии приемлемости вероятности обрушения, так как с увеличением масштаба деформаций, как правило, последствия и риски увеличиваются. В табл. 3 приведены типичные критерии приемлемости для вероятности обрушения в соответствии с масштабом откоса и предполагаемых последствий от обрушения.

Таблица 3

Критерии приемлемости вероятности обрушения карьерных откосов (PF)

Масштаб	Последствия обрушения	Вероятность обрушения, PF[FOS \leq 1], %
Уступы	Небольшие	40%
	Средние	30%
	Значительные	20%
Группа уступов между транспортными съездами	Небольшие	20%
	Средние	15%
	Значительные	10%
Борт карьера в целом	Небольшие	15%
	Средние	10%
	Значительные	5%

Последствия от обрушения уступов, групп уступов и бортов могут быть значительными в местах расположения объектов внутрикарьерной

инфраструктуры, при потере транспортного съезда, при наличии групп уступов большой высоты без широкой предохранительной бермы между ними и др. Последствия от обрушений могут быть незначительными на участках вне зоны ведения горных работ, не влияющие на технологический процесс, а также характерны для откосов с коротким сроком их стояния, при условии обеспечения безопасности работ средствами комплексного мониторинга устойчивости, наличия резервного транспортного съезда и др.

Управление рисками

При проведении оценки рисков для управления устойчивостью откосов (риск-менеджмент), участки основных геомеханических рисков выявляются в течение всего периода отработки карьера, в его текущих контурах, и на их основе организовываются контролирующие и стабилизирующие мероприятия.

К геомеханическим рискам в карьере относятся: участки карьера с повышенной вероятностью обрушений уступов, потенциальные макроблоки обрушения групп уступов различного масштаба, потенциальная неустойчивость борта карьера, участки с повышенным уровнем камнепада, зоны ослабленных пород, склонных к сложным механизмам деформирования или оползневым процессам, участки с наличием подземных горных выработок (пустотами), участки интенсивного высачивания грунтовых вод, разжижение, обводнение, селевые потоки, природные обвалы (камнепады), снежные лавины, оползание откоса, связанное с пластической деформацией многолетнемерзлых пород, сектора отвалов на слабом, наклонном основании, нагруженные горной техникой, периодическая сейсмическая активность региона.

При управлении устойчивостью откосов на основе оценки геомеханического риска (R), оцениваются составляющие его факторы: вероятность обрушения откоса (PoF) и тяжесть последствий от обрушения (*Последствия*) [11]:

$$R = PoF \times (\text{Последствия}),$$

Оценка и управление рисками выполняются с помощью матрицы рисков [12], которая отображает качественные, полуколичественные или количественные показатели рисков (рис. 9).

Матрица рисков		Последствия					
		Незначительные	Низкие	Средние	Высокие	Чрезвычайные	
Вероятность риска		1	2	3	4	5	
Качественная	Количественная						
A	Очень высокая – Событие происходит постоянно с высокой степенью определенности. Произойдет с очень высокой степенью определенности.	>40%	Средний	Высокий	Высокий	Очень высокий	Очень высокий
B	Высокая – Событие происходит часто с высокой степенью определенности. Произойдет с высокой степенью определенности	20÷40%	Низкий	Средний	Высокий	Высокий	Очень высокий
C	Средняя – Событие может произойти. Происходило ранее.	10÷20%	Низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
D	Низкая – Маловероятное событие. Может произойти в определенный момент.	1÷10%	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
E	Очень низкая – Разумная уверенность, что событие не произойдет. Может произойти в исключительных обстоятельствах.	<1%	Очень низкий	Низкий	Средний	Средний	Высокий

Рис. 9. Матрица оценки рисков

Вероятность риска может характеризоваться как качественным описанием (категории А-Е), так и количественной оценкой на основе инженерного анализа (вероятность обрушения PoF , %) или на основе анализа частотных характеристик, с учетом фактических данных о неблагоприятных событиях.

Последствия от обрушений могут выражаться как качественными характеристиками (незначительные - чрезвычайные), так и количественными (экономические характеристики).

При анализе возможных последствий для безопасности персонала они могут иметь следующую градацию: незначительные – отсутствие травм; низкие – оказание первой помощи; средние – травмы, требующие медицинского вмешательства; высокие – обширные травмы, постоянная нетрудоспособность; чрезвычайные – летальный исход. Однако, при оценке геомеханических рисков и выработки на их основе стабилизирующих мероприятий, наличие потенциальной угрозы жизни и здоровью людей должно характеризоваться чрезвычайной категорией последствий.

При анализе возможных экономических последствий, в качестве примера, они могут оцениваться количественно с учетом следующей шкалы: незначительные – менее 1000\$, небольшие – менее 10 000\$, средние – менее 100 000\$, значительные – менее 1000 000\$, очень высокие и катастрофические – менее или в отдельных случаях выше 10 000 000\$.

На основании этого, оптимизировать конструкции откосов и снизить геомеханические риски возможно путем снижения вероятности обрушения или тяжести последствий. Снижение вероятности обрушения достигается улучшением достоверности исходных данных, детализацией расчетных

моделей с вовлечением в них максимального числа влияющих факторов (что позволяют осуществлять современные программные комплексы), дренаж, изменение конфигурации откосных сооружений, улучшение качества заоткосных работ на предельном контуре, разработка стабилизирующих мероприятий (крепление) и др. Негативные последствия от обрушений зависят от наличия внутрикарьерной инфраструктуры, расположения съездов и рабочих площадок и масштаба деформаций. Их влияние уменьшается применением мероприятий (организация мониторинга, проектирование широкой улавливающей бермы, резервного транспортного съезда, совершенствование системы безопасности персонала и горной техники при работе на потенциально опасных участках и др.).

В соответствии с оцениваемым уровнем риска по рис. 9, вырабатываются необходимые меры реагирования в соответствии с табл. 4.

Таблица 4

Меры реагирования в соответствии с уровнем риска

Уровень риска	Меры реагирования
Очень высокий	Немедленное снижения рисков с приостановкой работ на данном участке карьера, проведение дополнительных исследований и мероприятий по снижению рисков
Высокий	Оперативное реагирование, снижение риска в краткосрочной перспективе и проведение анализа и мероприятий по снижению рисков
Средний	Находится на границе допустимого риска, требует анализа и долгосрочного снижения рисков
Низкий и очень низкий	Допустимый риск, должен находиться под контролем, но не требует дополнительных мероприятий по его снижению

В международной практике, по результатам выявления потенциальных рисков для конкретного месторождения создается План Управления Состоянием Массива (ПУСМ), в котором прописывается реестр рисков с планируемыми мероприятиями по их снижению и другая обобщенная геомеханическая информация по месторождению.

Выводы

Ввиду недоизученности и неоднородности факторов, учитываемых при обосновании устойчивости откосов, возникает неопределенность, вследствие чего возникают определенные риски возникновения деформаций в карьере.

Количественная инженерная оценка риска основывается учете влияния изменчивости факторов и оценке вероятности обрушения. Вероятностный подход, наряду с детерминированным, используется для обоснования проектных параметров откосов различных масштабов – уступы, группы уступов и борта.

Для управления устойчивостью откосов на основе оценки рисков качественно или количественно оцениваются вероятность обрушения откоса и тяжесть возможных последствий на всех участках карьера с выявленными геомеханическими рисками. Одним из способов такой оценки является матрица рисков, на основе которой вырабатывается стратегия по необходимым мерам реагирования на различные уровни рисков.

Риск ориентированный подход позволяет объективно оценить возможность образования случайных негативных событий при текущем уровне изученности месторождения и применять наиболее рациональные профилактические мероприятия на протяжении срока отработки карьера.

Список литературы

1. Рид, Д., & Стейси, П. Руководство по проектированию бортов карьера (перевод с английского). CSIRO, 2015. 544 с.
2. Chiwaye Н.Т. A comparison of the limit equilibrium and numerical modelling approaches to risk analysis for open pit mine slopes / A dissertation submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment / University of the Witwatersrand. Johannesburg 2010. 145 p.
3. Tapia A. et al. Risk Evaluation of Slope Failure at the Chuquicamata Mine // International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering / ACG, Perth, 2007, pp. 477-495.
4. Хормазабаль Э. Проектирование конструктивных элементов борта карьера с использованием метода вероятностного анализа ключевых блоков / Горный журнал, 2015, № 3, с. 38-45.
5. Goodman, R. and Shi, G.H. Block theory and its application to rock engineering / Prentice Hall, USA, 1985. P. 338
6. Hormazabal, E. Bench-Berm Design using probabilistic Key Block Analysis // Slope Stability, Brisbane, ACG, Australia, 2013.
7. Esterhuizen, G. SBLOCK v. 2.01, User Guide and Reference Manual, gsester@gmail.com, 2004.
8. Макаров А.Б., Хормазабаль Э., Ливинский И.С., Спирин В.И., Солуянов Н.О.. Методика обратных расчетов сцепления и трения по трещинам по фактам вывалов с бортов карьеров // Горный журнал «Маркшейдерия и недропользование» №4, 2016.
9. Gibson W. FracRock v.3.1, User manual, 2018. P.41.
10. Contreras L-F, Quantitative evaluation of economic risk for pit slope design. Newsletter №47. ACG. 2018
11. Joy J., Griffiths D. National minerals industry safety and health risk assessment guideline, 2007. P.157.
12. Hadjigeorgiou J. Understanding, managing and communicating geomechanical mining risk // Mining Geomechanical Risk Conference / ACG, Perth 2019

Спирин Виктор Игоревич, ISRM, старший консультант по геомеханике, vspirin@srk.ru.com, Россия, Москва, SRK Consulting (Russia),

Ливинский Иван Сергеевич, ISRM, руководитель отдела геомеханики и гидрогеологии, ilivinsky@srk.ru.com, Россия, Москва, SRK Consulting (Russia),

Хормазабаль Эстебан, ISRM, MSc, MAusIMM, SAIMM, QP, генеральный директор, главный консультант по геомеханике, ehormazabal@srk.cl, Чили, Сантьяго, SRK Consulting (Chile).

RISK-BASED OPTIMIZATION OF OPEN PIT SLOPES

V.I. Spirin, I.S. Livinsky, E. Hormazabal,

This paper presents an approach to assessing risks based on probabilistic analysis of open pit slope stability at various scales.

Keywords: risk, probability of failure, consequences, slope scale, data uncertainty, effective berm width, sensitivity analysis, probabilistic analysis, risk matrix

Spirin Victor Igorevich, ISRM, senior geomechanical consultant, vspirin@srk.ru.com, Russia, Moscow, SRK Consulting (Russia),

Livinskiy Ivan Sergeevich, ISRM, head of geotechnical and hydrogeological department, ilivinsky@srk.ru.com, Russia, Moscow, SRK Consulting (Russia),

Hormazabal Esteban, ISRM, MSc, MAusIMM, SAIMM, QP, general manager, principal geomechanical consultant, ehormazabal@srk.cl, Chile, Santiago, SRK Consulting (Chile).