

УДК 624.131.542.001.63

Левин Евгений Львович

главный специалист
отдела открытых горных работ,
транспорта и генплана,
АО «Гипроруда»,
196247 г. Санкт-Петербург, Ленинский пр., 151
e-mail: elevin@giproruda.ru

Сердюков Андрей Леонидович

генеральный директор,
АО «Гипроруда»
e-mail: serdyukov@giproruda.ru

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ
ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ,
ДЕФОРМАЦИИ БОРТА
ПРОЕКТИРУЕМОГО КАРЬЕРА
С ДИНАМИЧЕСКИМ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ
ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ
ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА
СПЕКТРАЛЬНОГО
СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ**

Аннотация:

В АО «Гипроруда» разработаны вероятностные модели предельного равновесия и деформации борта карьера на основе методических материалов ВНИМИ. Эти модели формируются в матричном виде с использованием БД и встроенных средств программирования MS Office Pro и разработанной матричной модели горно-транспортных работ PitDelevel.

Разработан набор процедур автоматизированного построения возможных поверхностей скольжения в условиях пространственно неоднородных физико-механических свойств (ФМС) прибортового массива и зон его ослабления.

Предлагается использовать разработанную модель массового взрыва и динамическое спектральное сейсмопрофилирование прибортового массива в наиболее опасных зонах для выявления локализаций, резонансных частот и параметров блоков в зоне поверхностей скольжения для регулирования порядка отработки карьера, параметров БВР и приведения борта в устойчивое состояние.

Ключевые слова: карьер, коэффициент запаса устойчивости, вероятность обрушения, неопределенность свойств пород, спектр сейсмо-волн взрыва, автоматизированное проектирование

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.043

Levin Eugene L.

chief specialist,
the department of open pit mining,
transport and general layout Design,
JSC «Giproruda»,
196247 St-Petersburg, 151 Leninsky av.
e-mail: elevin@giproruda.ru

Serdyukov Andrey L.

general director,
JSC «Giproruda»
e-mail: serdyukov@giproruda.ru

**PROBABILISTIC MODELS
OF LIMIT EQUILIBRIUM
AND FACE DEFORMATION DESIGNED
OPEN PIT WITH DYNAMIC PARAMETERS
PREDICTION OF SLIDING SURFACES
USING THE METHOD OF SPECTRAL
ANALYSIS OF SEISMIC PROFILING**

Abstract:

JSC "Giproruda" developed probabilistic models of limit equilibrium and deformation of open pit face based on methodical materials VNIMI. These patterns are formed in matrix form using the data base and embedded software MS Office Pro and matrix model of mining and transport PitDelevel.

A set of procedures was developed for the automated formation of possible slip surfaces in the conditions of spatially inhomogeneous physical and mechanical properties of face rock mass and its weakening zones.

It is proposed to use the developed model of mass explosion and dynamic spectral analysis of the array in the most dangerous zones of face rock mass to reveal the localization of resonance frequencies and parameters of blocks in the zone of surfaces sliding for regulation the order of open pit mining, parameters of drilling and blasting and transition the face in stable state.

Key words: open pit, safety factor for stability, the probability of the collapse, the uncertainty of rock properties, spectrum of explosion seismic waves, computer-aided design

При проектировании карьера одной из важнейших задач является установление параметров его бортов, обеспечивающих экономичную и безопасную отработку. Известные методики оценки коэффициентов запаса устойчивости (КЗУ) [1] и надежности

устойчивого состояния борта [2 – 4] не в полной мере учитывают вероятностный характер физико-механических свойств прибортового массива, влияние спектра сейсмических волн от массовых взрывов на ослабленный массив.

Прогнозирование вероятности и параметров возможных обрушений при известных свойствах массива и их вариациях, спектрах сейсмических волн от взрывов, выявленных резонансных свойств прибортового массива позволяет повысить надежность проектных и плановых конечных и промежуточных контуров карьера, минимизировать сейсмическое воздействие взрывов на прибортовой массив.

Разработанные в АО «Гипроруда» компьютерные средства для решения вышеуказанных задач кратко представлены ниже в двух разделах.

Оценка вероятности обрушения борта карьера.

В работах [2, 3] отмечено, что при значении КЗУ, равном 1,0, устойчивое или неустойчивое состояние породного массива – события равновероятные с надежностью устойчивого состояния породного откоса, равного 50 % (вероятность обрушения 50 %). При коэффициенте запаса 1,4 [1] надежность устойчивого состояния породного откоса близка к 100 % и вероятность обрушения мала. В рассматриваемом ниже примере одного из крупных и глубоких действующих карьеров разброс измеренных показателей сцепления руд и пород укладывается в диапазон $\pm 40\%$ от среднего, а угла внутреннего трения – в $\pm 30\%$.

Теоретическое значение надежности устойчивого состояния откоса может быть определено из формул (1) – (3) [2]:

$$N_T = \exp \left[\left(\frac{1}{n_3} \right)^{v_3} \cdot \ln 0,5 \right], \quad (1)$$

где N_T – теоретическая надежность устойчивого состояния породного откоса, доли ед.;

n_3 – математическое ожидание коэффициента запаса устойчивости, доли ед.;

v_3 – коэффициент вариации коэффициента запаса устойчивости, доли ед.

В предположении о близости закона распределения прочностных характеристик пород прибортового массива к нормальному надежное значение КЗУ по «правилу 3-х сигм» следующее:

$$n = \mu + 3 \cdot \delta, \quad (2)$$

где n – страховочный КЗУ;

δ – среднеквадратическое отклонение КЗУ;

μ – математическое ожидание КЗУ.

Коэффициент вариации КЗУ определим из следующего выражения:

$$v = \frac{\delta}{\mu}. \quad (3)$$

В соответствии с (1) и (2) при математическом ожидании КЗУ и принятом $\mu = 1$ страховочном коэффициенте запаса $n = 1,4$, из формул (2) – (3) получим величину коэффициента вариации КЗУ, равную 0,133.

Подставляя n и v в (1), получаем оценку надежности устойчивого состояния борта. Надежность устойчивого состояния борта карьера и его участков в зонах ослабления можно оценить по формуле (1) после установления наиболее опасных поверхностей скольжения и определения математического ожидания КЗУ при известном коэффициенте его вариации.

В «Руководстве по проектированию бортов карьера», выпущенном в 2009 г. под редакцией Джона Рида и Питера Стейси и переведенном на русский язык в 2015 г. [4], представлен обширный материал по используемым в зарубежной практике методикам проектирования бортов и оценки их устойчивости и вероятности разрушения.

Авторы «Руководства...» [4] считают, что метод моделирования НДС дискретных сред (метод дискретных элементов – программы UDEC, Itasca и ее эквивалент для трехмерного моделирования 3DEC, Itasca) имеет более высокую точность определения КЗУ, чем методы, основанные на расчетах предельного равновесия (при достаточной полноте и точности определения ФМС в ячейках модели).

Однако там же [4] в приложении 3 приведены сравнительные результаты расчетов КЗУ разными методами с помощью компьютерных программ двумерной модели метода конечных элементов и программы Slide компании RocScience (рассматривались разные варианты внешних напряжений). Расчетные КЗУ оказались близкими в сравниваемых методах. Резюмируя, авторы [4] отмечают, что природные напряжения не оказывают значительного влияния на устойчивость откоса, а уровень неточностей, обычно связанных с геологическими моделями, свойствами породного массива и гидрогеологическими условиями, поглотит любые мелкие изменения, связанные с изменениями природных напряжений или геометрией карьера.

Похожий результат получен разработчиками предлагаемого нового метода ВНИМИ [7] при его сравнении с традиционными инженерными методами.

Предлагаемая вероятностная модель предельного равновесия (ВМПР) представляется развитием действующих отечественных разработок методов предельного равновесия с дифференциацией ФМС по ячейкам модели и автоматическим определением поверхностей скольжения, в том числе и в сценариях возможных внезапных ослаблений участков прибортового массива на горизонтах карьера.

Дополнительно к вышеприведенным (1) – (3) расчетным формулам в разработанной модели ВМПР реализована оценка надежности устойчивого состояния борта методом статистических испытаний (Монте-Карло) при задании законов распределения ФМС с помощью датчиков случайных чисел.

Разработанная модель ВМПР базируется на методике ВНИМИ [1], положениях по расчету надежности устойчивого состояния борта карьера [2 – 3] и дополнена разработанными алгоритмами и расчетными модулями. Модель реализована в среде MS Excel и СУБД MS Access с использованием встроенных средств программирования и матричной модели горнотранспортных работ PitDelevel.

Геологическая рудно-породная модель с внесенными в нее физико-механическими и другими свойствами может быть сформирована в известных горно-геологических пакетах программ и после ее импорта в базу данных будет готова для формирования ВМПР профилей прибортового массива. Возможно применение готовых инженерно-геологических разрезов.

Разработанные модули обеспечивают возможность оценки КЗУ и вероятности обрушений при вариации свойств пород как на поверхности скольжения, так и в промежуточных положениях этих поверхностей и на горизонтах с учетом известных зон ослабления и расчетных поверхностей скольжения в прибортовом массиве.

ВМПР формируется на основе показателей ФМС ячеек рудно-породной модели месторождения. Модель строится с разбивкой прибортового массива на профили (инженерно-геологические разрезы) и на отсеки – вертикальные полосы достаточно малой ширины.

Автоматизированное определение наиболее напряженной поверхности скольжения выполняется с использованием встроенного в Excel модуля оптимизации при задании стартового положения поверхности скольжения и ограничений на диапазон изменяемых углов скольжения в отсеках, опирающихся на искомую поверхность скольжения. Пример построенной поверхности скольжения приведен ниже на рис. 1.



Рис. 1 – Результаты построения поверхности скольжения и оценки надежности устойчивого состояния борта карьера (ось справа) в зоне № 5 на модели ВМПР

На рис. 1 расчетная поверхность скольжения представлена ломаной «RL скольжения» (получена автоматически). Стартовая поверхность скольжения, задаваемая при поиске оптимальной поверхности вручную, представлена линией «RL цилиндрическая». Фактическое положение горных работ – ломаной «RL факт».

На этом же рисунке приведена ломаная «Теор. надежность» оценки устойчивого состояния борта (получена после расчетов КЗУ, см. ниже) и применения вышеприведенных формул (1) – (3), разработанных в [2].

Выборочные результаты расчетов КЗУ для одного из профилей представлены ниже в табл. 1. Расчеты КЗУ, площадей обрушения (на профилях) и надежности устойчивого состояния (и вероятностей обрушения) участков борта выполнены для средних значений ФМС. Надежность устойчивого состояния борта определена при коэффициенте вариации КЗУ, равном 0,133. Для зоны ослабления № 5 дополнительно приведены полученные на ВМПР оценки сдвигающих и удерживающих усилий по линии скольжения и КЗУ без учета упора на нижних горизонтах для случая внезапного ослабления зон упора возможных призм обрушения.

Из табл. 1 (зона № 2) видно, что с вероятностью 75 % возможно обрушение борта в отметках выше –20 м с площадью обрушения на профиле 2410 м² (вероятность обрушения 0,75 = 1,0 – 0,25). Это расчетное обрушение пространственно соответствует ранее произошедшей деформации. Ширина зоны влияния профиля 100 м, расчетный объем обрушения 241 тыс. м³. По паспорту деформации объем обрушения составил около 180 тыс. м³ при высоте зоны обрушения 105 м, ширине 100 – 150 м, глубине развития 15 м и длине горизонтальной проекции вывала 74 м.

Таблица 1

Показатели возможных обрушений в зонах и в отметках выхода линий скольжения в карьер на инженерно-геологическом профиле ВМПР

№№ зон	Нижние отметки поверхностей скольжения, м	-190	-140	-110	-80	-50	-20	10	40	70	100	130
		-150										
1	Площадь обрушения, м ² .							6 508	3 381	1 586	337	90
	КЗУ, д.е.							1.3	1.71	2.72	3.46	4.37
	Надежность, д.е.							0.91	0.99	1.00	1.00	1.00
2	Площадь обрушения, м ² .						2 410	1 956	1 581	1 317	514	68
	КЗУ, д.е.						0.91	0.91	0.9	0.97	1.22	1.51
	Надежность, д.е.						0.25	0.23	0.22	0.42	0.85	0.97
3	Площадь обрушения, м ² .		1 604	1 082	558	91						
	КЗУ, д.е.		1.31	1.3	1.46	1.33						
	Надежность, д.е.		0.91	0.91	0.96	0.92						
4	Площадь обрушения, м ² .	8 612	6 629	5 028	3 127	2 450	2 115	1 652	1 302	503	63	
	КЗУ, д.е.	1.36	1.52	1.49	1.28	1.35	0.97	1.37	3.96	7.11	7.11	
	Надежность, д.е.	0.93	0.97	0.97	0.90	0.93	0.41	0.94	1.00	1.00	1.00	
5	Площадь обрушения, м ² .	27 523	21 911	18 750	16 856	14 423	11 900	7 610	4 638	3 343	2 251	1 137
	КЗУ, д.е.	1.16	1.12	1.17	1.26	1.27	1.63	2.09	3.22	3.43	2.69	2.68
	Надежность, д.е.	0.80	0.75	0.80	0.88	0.89	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Сдвигающая сила по поверхности скольжения, МН	528	449	386	348	301	248	165	108	82	59	35
	Сила сцепления и трения без учета упора на нижних горизонтах, МН	590	460	351	318	282	239	169	121	90	62	35
	КЗУ без учета упора на нижних горизонтах, д.е.	1.12	1.02	0.91	0.91	0.94	0.96	1.02	1.12	1.10	1.05	1.00

В зоне ослабления № 5 на отметках от –190 м до –50 м также имеет место пониженная надежность борта и довольно высокая вероятность обрушения от 11 до 25 %. Более того, в отметках от –110 до –20 м КЗУ может стать меньше 1,0 при условии внезапного ослабления зон упора. При этом ослаблении деформация борта может начаться в отметках от –110 до –20 м. Укрепление зоны ослабления № 5 в этих отметках может повысить КЗУ всего борта.

Для доведения КЗУ в зоне № 5 (см. табл. 1) до уровня 1,0 необходимо увеличить удерживающие усилия на величину порядка $(386-248)-(351-239) = 26$ МН на 1 м фронта борта.

Спектральное сейсмопрофилирование прибортового массива и сейсмических волн от массового взрыва

С помощью вышеприведенной вероятностной модели обрушения были установлены наиболее опасные зоны инженерно-геологического профиля на основе имеющихся данных инженерно-геологических изысканий, являющихся основой для спектрального анализа массовых взрывов в этих зонах.

Применение метода активного спектрального сейсмопрофилирования (ССП) [6, 7] и пассивного сейсморезонансного метода обнаружения контрастных зон [10] на горизонтах и разрезах прибортового массива позволяет определить или уточнить зоны тектонических нарушений и ослаблений массива. В результате уточнения необходимо заново рассчитать на модели ВМПР наиболее опасные участки инженерно-геологических профилей с критическими величинами КЗУ.

Применение СПП позволяет также выявить наиболее опасные резонансные частоты и длины волн блоков и участков горного массива. Эти длины волн (и частоты) являются ориентирами для минимизации сейсмического воздействия массовых взрывов на наиболее опасные участки прибортового массива карьера.

Спектральный и временной анализ данных пассивного сейсмического мониторинга фона и массовых взрывов в карьере позволяет настроить модель массового взрыва

на конкретные характеристики приборного массива. Анализ выполняется на разработанной 3D модели массового взрыва (ММВ3D). Модель реализована в СУБД MS Access и в Excel с использованием встроенных средств программирования.

ММВ3D – дискретная модель волн напряжений от взрывов в зоне их упругого распространения в заданную 3D область приборного массива. Дискретность модели в пространстве 1 – 2 м, во времени 0,2 – 0,8 мс в зависимости от скорости распространения волн. В модели учтены геометрическое ослабление волн по мере их удаления от взрываемого блока, размещение скважин и исследуемой области в 3D. Импульс от взрыва отдельного заряда задается дискретно во времени (до 40 интервалов по 0,2 – 0,4 мс) с учетом забойки. Обычно эффективная длительность взрыва без забойки составляет 2 – 4 мс [8].

При моделировании взрыва скважин учтены координаты точки инициирования взрыва, скорость детонации и скорость распространения волн в массиве. Заряд каждой скважины представляется 5 – 10-ю и более интервалами по глубине. Имеется возможность учитывать временной разброс замедлений в средствах инициирования с помощью датчика случайных чисел с заданным законом распределения.

В результате моделирования массового взрыва формируется временной ряд суммы амплитуд волн от всех зарядов в исследуемой области приборного массива. Временной ряд трансформируется в спектральное представление волн от взрыва (метод быстрого преобразования Фурье во временных окнах). Расчетные амплитуды, частоты и длины волн, дошедших до исследуемых точек, позволяют выявить потенциально опасные блоки приборного массива, в которых при резонансе частоты волны и собственных частот блоков произойдет значительное снижение сцепления и коэффициента трения [4, 9] на границах блоков и на поверхностях скольжения.

При моделировании взрывов задаются варианты замедлений и ориентация взрываемого блока относительно опасных участков массива с целью минимизации амплитуд гармоник взрывных волн и смещения их частот для нейтрализации резонансов в блоках приборного массива.

Ниже приведены некоторые результаты моделирования массового взрыва в действующем карьере (Ковдор) при ориентации продольной оси взрываемого блока 90 градусов и под углом 45 градусов к направлению на исследуемую область приборного массива на дистанции 100 м от центра взрыва. Расстояние между взрываемыми скважинами в ряду 8 м (20 скважин в ряду) и между рядами – 6 м (5 рядов). Замедления между скважинами в ряду 4 мс и между рядами скважин 78 мс. Форма и длительность взрывного импульса принята из результатов анализа взрывов на карьерах Кривбасса в скальных породах без забойки [8].

На рис. 2 – 3 представлены результаты моделирования взрыва с продольной осью блока, идущей под углами 90 и 45 градусов к направлению на исследуемую область.



Рис. 2 – Сигнал и спектр от взрыва блока при направлении 90 градусов



Рис. 3 – Сигнал и спектр от взрыва блока при направлении 45 градусов

Ниже на рис. 4 – 5 приведены спектры, у которых ось абсцисс трансформирована из временных отсчетов взрыва в длины сейсмоволн.

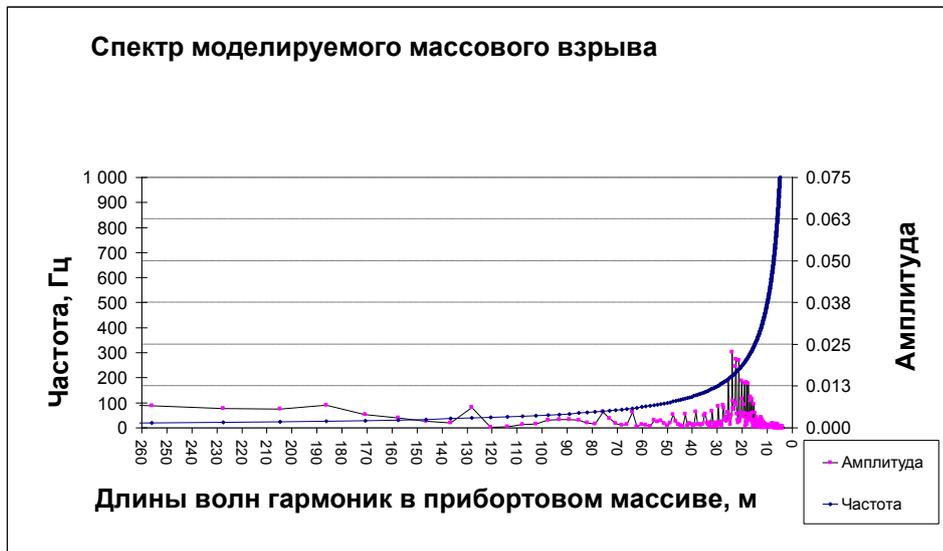


Рис. 4 – Спектр при направлении 90 градусов

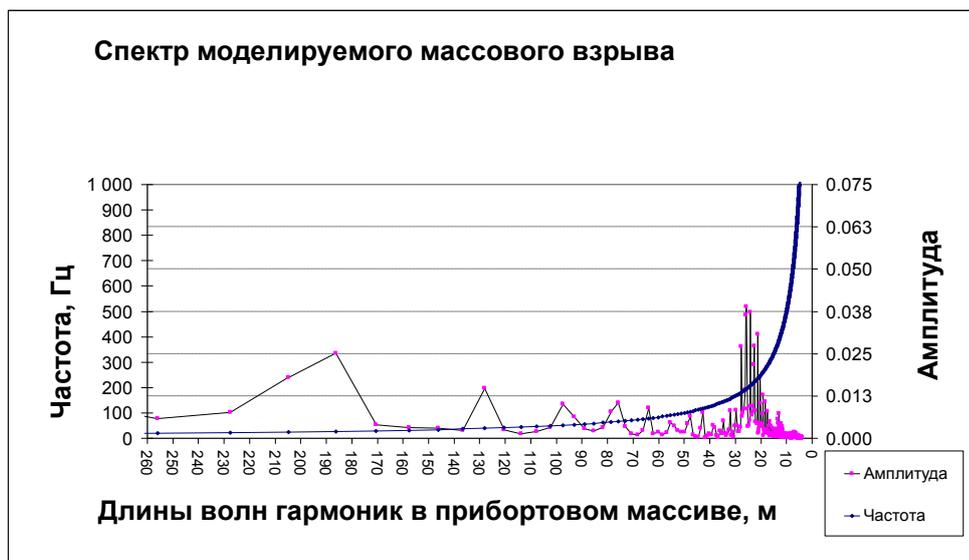


Рис. 5 – Спектр при направлении 45 градусов

Сравнение пиковых амплитуд и соответствующих длин сейсмических волн (рис. 4, 5), приходящих в исследуемую область прибортового массива, показывает, что наиболее опасными при взрыве 5-ти рядов скважин в направлении 90 и 45 градусов являются высокочастотные гармоники с длинами волн 15 – 25 м. В области низких частот выявлены потенциально опасные гармоники с длинами волн 160 – 220, 130, 65 – 95 м, сопоставимые с мощностью зон упора поверхности скольжения (см. рис. 1). При этом амплитуды сейсмических волн в направлении под углом 45 градусов к длинной оси взрывающегося блока значительно выше (в 1,5 – 4 раза), чем в направлении 90 градусов.

Высокое быстродействие разработанной модели массового взрыва ММВ3D позволяет в сжатые сроки выполнить десятки вариантов спектрального анализа массовых взрывов в несколько заданных областей с установлением рациональных (по минимуму сейсмического воздействия на прибортовой массив) параметров ориентации, количества рядов и скважин и замедлений в оцениваемом взрывном блоке. Ограниченный размер статьи не позволяет привести более подробные результаты моделирования взрывов в вариантах места расположения взрывающегося блока в карьере, комбинаций их размеров, ориентации, замедлений и затуханий взрывных волн, дистанции от взрыва до исследуемой зоны.

Выводы

В разработанной и апробированной в АО «Гипроруда» матричной вероятностной модели предельного равновесия борта карьера реализовано автоматизированное определение наиболее напряженных поверхностей скольжения. Рассчитываются КЗУ, площади и объемы возможных обрушений и надежность устойчивого состояния борта на горизонтах карьера.

Применение метода спектрального сеймопрофилирования (ССП) и пассивного сейсморезонансного метода обнаружения контрастных зон и резонансных частот на горизонтах и разрезах прибортового массива позволяет определять или уточнять зоны тектонических нарушений и ослаблений массива, поверхности скольжения и участки инженерно-геологических профилей с критическими величинами КЗУ.

Применение разработанного комплекса по моделированию взрывов и спектрально-временной оценке взрывных волн позволяет более обоснованно выбирать параметры замедлений, размеры, ориентацию взрывных блоков, сетку скважин для минимизации сейсмического воздействия на опасные по вероятности обрушения участки борта карьера в динамике отработки прибортового массива.

Комплекс достаточно просто адаптируется к предстоящему значительному изменению нормативных требований и правил обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов при проектировании и планировании горных работ.

Литература

1. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров. — Л.: ВНИМИ, 1972.
2. Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров / С.З. Полищук и др. — Днепропетровск: Полиграфист, 2001. — 371 с.
3. Арсентьев А.И. Устойчивость бортов и осушение карьеров / А.И. Арсентьев, И.Ю. Букин, В.А. Мироненко. — М.: Недра, 1982. — 165 с.
4. Руководство по проектированию бортов карьера / П. Стейси и др.; под ред. Дж. Рида, П. Стейси; пер. с англ. А.С. Бентхен. — Екатеринбург: Правовед: Полиметалл, 2015. - 528 с.
5. Хархордин И.Л. Численный метод оценки устойчивости карьерных откосов / И.Л. Хархордин, А.Н. Гурин // Сб. научн. трудов ВНИМИ. - СПб.: Наука, 2012. - С. 195 - 203.
6. Гликман А.Г. Основы спектральной сейморазведки / А.Г. Гликман [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://newgeophys.spb.ru/> 2002-2013.

7. Мельник В.В. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для прогноза и снижения риска аварий и катастроф при недропользовании / В.В. Мельник, А.Л. Замятин, А.Л. Пустуев // Горный журнал. - 2012. - № 1. - С. 86 - 89.

8. Ткачук К.Н. Управление разрушением горных пород взрывом на карьерах / К.Н. Ткачук, К.К. Ткачук, О.Я. Тверда [Электронное издание] Моногр. — Киев: Основа, 2015. — 262 с.

9. О возможности районирования карьера по степени сейсмической восприимчивости породных уступов при производстве массовых взрывов / В.А. Фокин и др. // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сб. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. / ГоИ КНЦ РАН. - Апатиты; СПб., 2013. - С. 229 - 241.

10. Адушкин В.В. Микросейсмический мониторинг геодинамически активных тектонических структур / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сб. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. / ГоИ КНЦ РАН. - Апатиты; СПб., 2013. - С. 30 - 55.