2017

<u>№</u> 4

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 550.3 + 551 + 622.33.013.3 + 681:624.1

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ФОРМ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ КАМЕРЫ ПРИ ВЗРЫВАХ ЗАРЯДОВ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В. Н. Опарин^{1,2}, В. Ф. Юшкин¹, В. К. Климко³, Д. Е. Рублев¹, А. С. Изотов¹, А. В. Иванов⁴

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: 114@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия ²Новосибирский государственный университет, E-mail: oparin@misd.ru, ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия ³Таштагольский филиал ОАО "Евразруда", ул. Ленина, 21, 652970, г. Таштагол, Россия ⁴Сибирский государственный университет геосистем и технологий, E-mail: geodata1000@gmail.com, ул. Плахотного, 10, 630108, г. Новосибирск, Россия

На примере рудника "Таштагольский" рассмотрены вопросы определения форм поверхности подземной камеры, образованной взрывами зарядов при отработке рудного тела в напряженном массиве горных пород блочно-иерархического строения. По данным лазерного сканирования одной из камер получены линейные и угловые характеристики ее поверхности. Анализ структуры поверхности позволяет определить детали блочного строения разрабатываемого массива, оказывающего существенное влияние на формирование свода камеры и ее бортов. Для описания форм отдельных участков поверхности использован метод аппроксимации данных измерений координат границ камеры в ее сечениях с помощью кривых второго порядка, включающих окружности и эллипсы, радиусы которых канонически связаны с проявлением эффектов зональной дезинтеграции в окрестном массиве.

Рудный массив, вид напряженного состояния, взрыв зарядов, подземная камера, лазерное сканирование, формы поверхности камеры, блочно-иерархическое строение, метод аналитического описания, эффект зональной дезинтеграции

Освоение запасов железорудных месторождений в Кузбассе с применением соответствующих буровзрывных технологий выемки руды сопровождается, как правило, динамическими явлениями [1, 2]. Горно-геологические и геомеханико-геодинамические условия рудника "Таштагольский" обусловливают высокую удароопасность породных массивов, которая реализуется в разных формах динамических проявлений горного давления: от стреляний и заколообразования пород до горно-тектонических ударов, с повышенной активностью в первые часы после массового взрыва и переходом на фоновые значения в трехдневный период [1–4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01282).

Предпосылками удароопасности служат высокие показатели деформационно-прочностных характеристик руд и вмещающих пород, а также гравитационно-тектоническая напряженность массива, проявляющаяся по простиранию отрабатываемых рудных тел [1-3].

В [5] выполнены систематические исследования и обобщения шахтной сейсмологической информации в условиях отработки Таштагольского железорудного месторождения камерными системами с обрушением крупномасштабными технологическими взрывами, где на основе оригинального метода сканирования индуцированных сейсмособытий осуществлена верификация критерия "схлопывания" подземных выработок при их образовании. В [6] объяснение этому факту дано с позиций кинетической концепции прочности твердых тел по С. Н. Журкову [7].

Руды и вмещающие породы Таштагольского месторождения — прочные, высокомодульные, хрупко разрушающиеся под нагрузкой — способны аккумулировать высокие значения упругой энергии. По этим причинам рудник отнесен к категории удароопасных. Ведение подземных горных работ в сложных горнотехнических условиях приводит к специфическим особенностям отработки подземных камер, поэтому анализ причин, установление механизмов и прогнозирование влияния горных работ на нелинейные деформационные процессы в окрестном массиве, определяющие устойчивые формы их проявлений, представляют актуальную проблему, важность которой возрастает с увеличением глубины освоения рудной залежи.

Горные работы по подготовке и отработке рудного тела взрывными способами значительно влияют на формирование геомеханической обстановки на месторождении, которая существенным образом связана с проявлением зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [8, 9]. Это заставляет обратить внимание на причинно-следственную связь ее проявления и влияния на формы возникающих обнажений в выработках. Здесь наряду с уровнем и видом напряженно-деформированного состояния необходимо учитывать также реальное блочно-иерархическое строение массива горных пород. Класс задач, решаемый в рамках известных моделей дезинтеграционных проявлений [8, 9], зависит от ряда факторов, которые могут быть определены экспериментально в натурных условиях.

Условия взрывания больших по весу зарядов взрывчатого вещества (BB) при формировании подземных камер влияют не только на эффективность дробления пород в заданном объеме массива, но и на нарушение его естественной сплошности вне проектного контура образующейся камеры. Поэтому спектральный состав и скоростные характеристики упругих волновых пакетов в ближней к месту взрыва зоне зависят от размеров "работающих" блоков [10, 11]. При распространении сейсмических волн вдоль возникающих обнажений пород камеры они, естественно, будут оказывать определенное влияние на устойчивость обнажений.

Таким образом, сложное (нелинейное в своей основе) действие тектонического поля напряжений, повышенный уровень сейсмического влияния на характер движения структурных элементов массивов горных пород, зависящих от размеров образующихся подземных полостей [6], приводят к весьма изменчивым по своему рельефу и "общему виду" формам поверхностей. *В этой связи возникает задача аналитического описания как "общего вида" поверхностей обнажений в подземных выработках, так и их "шероховатостей" в виде различных по размерам и форме выступов, сколов, отслоений и т. д., что отражает как естественное блочно-иерархическое строение напряженных массивов горных пород, так и процессы их вторичного (технологического) дробления.*

Решение подобного рода задач перспективно для их использования в комплексных мониторинговых системах дистанционного контроля смещений и деформаций обнажений пород, количественного анализа развивающихся во времени реологических процессов, связанных с последующей эволюцией форм поверхностей подземных выработок и, в частности, камер. Мониторинговые системы могут быть полезны для изучения "устойчивых форм" обнажений горных пород вокруг подземных выработок в заданных по геологическому строению и виду напряженно-деформированного состояния отрабатываемых продуктивных тел твердых полезных ископаемых. Возможна постановка и "обратной задачи" геомеханики.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОТРАБОТКИ ПОДЗЕМНОЙ КАМЕРЫ ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА В ЭТАЖЕ – 210 ÷ – 140 м

Удароопасными рудами и породами Таштагольского месторождения являются магнетитовая руда, сиениты, скарны, диориты, туфосланцы. По физико-механическим свойствам пород и руд, уровню напряжений, действующих в породном массиве, проявлению горных ударов участки месторождения "Восточный" и "Северо-Западный" — с горизонта – 70 м и ниже, участок "Юго-Восточный" — с горизонта + 70 м и ниже относятся к "опасным" по горным ударам [1].

Естественное напряженное состояние горного массива на руднике "Таштагольский" вне зоны влияния очистной выемки на глубине 300-600 м от поверхности определяется величиной и направлением главного напряжения σ_1 , действующего по простиранию рудной залежи. Компоненты главных напряжений находятся в соотношении [1-3]:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 2.5 : 1.3 : 1, \tag{1}$$

где σ_1 — максимальное сжимающее напряжение; σ_2 — напряжение, действующее вкрест простирания; σ_3 — напряжение, действующее вертикально, равное весу налегающих пород γH (γ , H — соответственно объемный вес и высота налегающих пород). Установлено, что вне зоны влияния очистных работ напряжение σ_1 действует в северо-западном направлении по азимуту $320 \pm 20^\circ$. В зоне влияния очистных работ оно направлено по азимуту $35-75^\circ$ и достигает величины $5\gamma H$, напряжение $\sigma_2 = 3.5\gamma H$, $\sigma_3 = \gamma H$. В целом, по разным оценкам, уровень действующих напряжений в массиве рудника варьирует от 40 до 140 МПа (горизонт – 350 м).

Разработка рудной залежи на руднике ведется системами этажно-принудительного обрушения с закладкой выработанного пространства. Камеры в плане проектируют в форме, близкой к прямоугольной или эллипсовидной, и располагают длинной осью вкрест простирания рудного тела [1-4]; их ширина составляет 13-15 м, длина — от 27 до 40 м (см. рис. 1a). На руднике используют технологию отбойки руды зарядами BB, расположенными в пучках параллельно сближенных нисходящих скважин диаметрами 105-125 мм, глубиной 50-60 м (рис. 16). Массовый взрыв позволяет обрушить до 100 тыс. м³ руды и более.

Выемка подземной камеры 1 блока № 13 на СЗУ началась в 2008 г. Пройдены нарезные выработки, из которых осуществлялось бурение пучков нисходящих вертикальных скважин. Фрагмент сводных данных по параметрам буровзрывных работ с указанием проектных и фактических размеров скважин, величин зарядов и интервалов замедления в соответствии с планом на рис. 1, приведен в табл. 1. Скважины диаметром 105 мм бурят "пучком" или "по дуге" с ориентацией выпуклости последней в сторону отбойки. Расстояние между пучковыми зарядами принимают 4–5 м. Линия наименьшего сопротивления (ЛНС) при взрывании на зажатую среду составляет 4 м, при отбойке на компенсационную камеру — 5 м. Количество BB на 1 пог. м скважины составляет 8.5 кг, удельный расход — 0.5–0.6 кг/т.



Рис. 1. План бурового горизонта (*a*) и разрез 13 – 13 (*б*) подземной камеры 1 блока № 13 на Северо-Западном участке (СЗУ) рудника "Таштагольский" (размеры камеры указаны в метрах)

Номера пучков и скважин	Взр	ЫВ	Длина сква	жин, м	Заряжаема скважин	ия часть ны, м	Количество	Интервал
	Дата	Время	по проекту	факти- ческая	по проекту	факти- ческая	ВВ на сква- жину, кг	замедления, мс
П3: скв. 1÷6	10.05.08	10^{00}	44.5	44.5	44	44	374	25
П8: скв. 1÷5			44.5	44.5	44	44	374	ДШ
П14: скв. 1÷6			44.5	44.5	44	44	374	50
Всего			756.5	756.5	748	748	6358	
П4: скв. 1÷6	24.05.08	15^{01}	44.5	44.5	44	44	374	50
П9: скв. 1÷5			44.5	44.5	44	44	374	ДШ
П15: скв. 1÷6			44.5	44.5	40	40	340	25
Всего			756.5	756.5	724	724	6154	
П2: скв. 1÷6	19.07.08	08^{01}	56.5	56	25	25	212.5	75
П7: скв. 1÷5			56.5	56	25	25	212.5	ДШ
П13: скв. 1÷6			56.5	56	25	25	212.5	175
Всего			960.5	952	425	425	3612.5	
П1: скв. 1÷6	03.08.08	08^{00}	57	57	20	20	170	100
П6: скв. 1÷5			57	57	20	20	170	ДШ
П12: скв. 1÷6			57	57	20	20	170	50
Всего			969	969	340	340	2890	
Итого			3442.5	3434	2237	2237	19014.5	

ТАБЛИЦА 1. Параметры буровзрывных работ, СЗУ, гор. –210 м, блок № 13, камера 1

Для соблюдения проектных параметров отбойки руды необходимо контролировать направление и глубину бурения скважин. Это обеспечивается точностью установки буровой колонны в заданном направлении и использованием специальных приспособлений для устранения угловых отклонений, возникающих при бурении. Измерения показывают, что угловые отклонения нисходящих скважин могут отличаться от проектного направления до 5° и более, линейные отклонения на глубинах ~50 м в рудном теле достигают 4-5 м. Более точное бурение скважин позволит уменьшить выход негабаритной массы и снизить отказы зарядов BB. Скважины в пучках бурят параллельно. Фактическая длина скважин в ряде случаев отличается от проектной, что связано с пережатием их сечения при бурении. Предусматриваются "защитные расстояния" до закладочного пространства смежных камер, обеспечивающие отбойку руды без нарушений его стенок и кровли. Неполная зарядка скважин позволяет сохранить смежные выработки при проведении взрывных работ. После взрыва осуществляются выпуск руды, закладка выработанного пространства и подготовка очередной камеры к отбойке. Основные подготовительные и нарезные выработки, как и камеры, ориентированы вдоль направления действия максимального напряжения для "нетронутого" массива. Происходящие обрушения часто приводят к образованию значительных объемов негабарита, что снижает качество добываемого сырья.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Потенциально опасные участки проявления повышенного горного давления (стреляний, интенсивного заколообразования и др.) в рудном массиве связаны с краевыми зонами фронта ведения очистных работ, тектоническими нарушениями, границами литологических разностей и пр. Устойчивость горных выработок на этих участках обеспечивается приданием их поверхностям одной из "устойчивых форм": полигональной, сводчатой или арочной — в зависимости от конкретных горно-геологических, горнотехнических и геомеханических условий формирования выработок. В очистных блоках применяют компенсационные камеры с внутренней поверхностью, близкой к эллипсовидной форме для поперечных сечений по вертикали [1].

Для получения реальных отклонений от проектных размеров подземной камеры после взрыва и частичного выпуска руды перед заполнением закладочным материалом проведено сканирование ее бортов и кровли с использованием лазерного сканера Scan Station 2 фирмы Leica (Швейцария). В соответствии с проектом горных работ камера в плане должна иметь прямоугольную форму с размерами 14 × 32 м. Однако поверхность камеры после приведения ее в безопасное состояние перед закладкой приняла одну из "естественных устойчивых форм".

Сканирование выполнено с двух станций стояния сканера в бортовых подходах через противоположные выработки верхней части камеры с охватом в доступных пределах прямой видимости на глубину до 40 м от кровли [4, 12]. Это было целесообразно, поскольку кровля камеры, вытянутой по простиранию и имеющей длину в 2 раза больше ширины, после отбойки руды взрывами зарядов приобрела форму, существенно отличающуюся от проектной.

На рис. 2 показана трехмерная цифровая модель камеры, сканированной с двух точек стояния сканера m_1 и m_2 , вид сверху со стороны кровли. Модель может определять истинные линейные и угловые размеры камеры, объем закладки, форму свода ее кровли по состоянию на момент сканирования, учитывать эти размеры при проектировании смежных камер.

Трехмерная модель подземной камеры представляет интегрированную среду моделирования, которая позволяет распознавать геометрические формы ее поверхности, структурное строение породного массива, совмещать технологии синхронного и параметрического анализа объекта для выявления его стационарных состояний и движений в зависимости от энергии взрывов и, соответственно, вариации динамических нагрузок и скоростей деформирования блочной геосреды. Реальная геометрия поверхности контролируемой камеры после выгрузки руды определялась с выделением продольных и поперечных разрезов по вертикали шириной 2 м каждый (см. рис. 2), а также построением поперечных сечений по высоте камеры с интервалом 1 м.

Деформирование и разрушение пород вокруг полости "прямоугольной" в плане подземной камеры в условиях объемной деформации, когда горный массив испытывает на "бесконечности" неравнокомпонентное сжатие в трех взаимно перпендикулярных направлениях (по простиранию, вкрест простирания и по вертикали), являются в основном результатом действия максимальных касательных напряжений, что позволяет объяснить образование неравномерных выступов и сколов по бортам и в кровле камеры.



Рис. 2. Трехмерная модель поверхности кровли камеры (в плане), полученной с двух точек стояния сканера. Несканированные участки образованы перекрытием прямой видимости выступами бортов. Ширина каждого сегментированного разреза камеры 2 м. Сверху и слева указаны порядковые номера разрезов по длине и ширине

Согласно сканам продольных и поперечных разрезов камеры (рис. 3, 4), в кровле происходит формирование свода квазисферической формы, который минимизирует дальнейшее разрушение обнажения после взрывных работ. Это обстоятельство может свидетельствовать о проявлении зональной дезинтеграции горных пород, связанной с образованием чередующихся зон с разной степенью нарушенности пород, границы которых инициируют формирование последующих разрушений. Геометрические параметры таких зон определяются по методике В. Н. Опарина [8, 9, 13]. Их прогнозирование в настоящее время является отдельным предметом научных исследований [9, 14].



Рис. 3. Сканы поперечных разрезов 1 (*a*) и 5 (б) по вертикальному сечению камеры на расстоянии 6 и 14 м от левого борта соответственно (см. рис. 2). Здесь и на рис. 4 показаны углы наклона сколов и граней геоблоков в бортах и кровле



Рис. 4. Сканы продольных разрезов 1 (*a*) и 3 (*б*) по вертикальному сечению камеры на расстоянии 3 и 7 м от продольного борта соответственно (см. рис. 2)

По данным лазерного сканирования установлено, что поверхность камеры имеет "кусковато-шероховатый" характер, с проявлениями выступов, трещин и сколов разного масштабного уровня. "Кусковатость и шероховатость" обусловлены полиминеральностью, кристаллическим строением и другими особенностями структуры рудного тела, вмещающих его пород и вкраплений, а трещиноватость — в том числе и индуцированными процессами разрушения.

Возможность образования или смыкания трещин, а также их слияние при определенных условиях в более крупные позволяет представлять образующийся в камере поверхностный породный слой как "упруго-пластическую оболочку", по форме и размерам совпадающую с границами фракций отделившихся блоков пород. Характер разрушений бортов и кровли камеры показывает, что в изначально консолидированном массиве куски породы образуются по уже имевшимся дефектам, как "очагам" разрушений, сконцентрированным в напряженном массиве по ребрам и вершинам породных многогранников.

На поверхности бортов и кровли камеры после взрывной отбойки руды образовались трещины, которые за счет напряженного состояния массива и ослабления сил сцепления между структурными элементами инициировали в приповерхностных слоях пород появление новых микротрещин, увеличивающихся в размерах и переходящих в более крупные дефекты или образующих новые. Развитие таких трещин активизирует возникновение "магистральных" трещин с формированием "дефектных слоев", на пересечениях которых в породе образуются новые блоки с последующим их отслоением и выпадением в выработанное пространство. Процесс отслоений продолжается в пределах первой зоны дезинтеграции до достижения ее границы, на которой происходит "выравнивание" действующих сил. При этом породный массив практически перестает разрушаться, переходя в новое устойчивое состояние с поверхностью камеры, сечение которой в кровле принимает форму, близкую к круговой.

Поперечные разрезы камеры, показанные на рис. 3, характерны для краевого участка (a) (0–8 м от борта) и центральной ее части (δ). При их сравнении видно, что если свод краевого участка (см. рис. 3a) в целом имеет форму почти правильного клина с незначительными скруглениями по углам (радиусом до 0.5 м), то свод в центральной части камеры (см. рис. 3δ) принимает форму, близкую к круговой бо́льшего радиуса. Такой свод формируется в результате заколооб-

разования и шелушения пород. На изучаемой поверхности наблюдаются выступы не отделившихся блоков и заколы, размеры которых варьируют от 0.5 до 1.5 м. Отсутствие замкнутого контура на рис. За слева и в нижней части, а на рис. 36 — внизу обусловлено наличием выступов пород, перекрывающих зону сканирования.

Аналогично у сканов продольных разрезов камеры свод краевого участка на рис. 4a, являющийся по форме плоским и с незначительным уклоном, имеет "закругления" радиусом до 0.5-1 м; а в центре камеры на рис. 4δ он приобретает форму, близкую к круговой. При этом изменяется наклон к горизонту проявившихся блоков пород в кровле. Несколько бо́льшие углы наклона у блоков в бортах камеры (см. рис. 3δ) с увеличенными линейными размерами. На основе данных сканирования установлено, что отклонения геометрии свода кровли камеры от проектных отметок по вертикали достигают 3-5 м.

При рассмотрении сканов горизонтальных сечений камеры видно, что в ее бортах вблизи кровли (см. рис. 5a) образовались значительные выступы и сколы. Это привело к отклонениям проектных отметок от реальных до 2-5 м. Ниже выступы уменьшаются и сечение камеры становится по форме почти прямоугольным, со скруглениями на сопряжениях бортов (рис. 5δ).



Рис. 5. Сканы горизонтальных сечений камеры, выделенных на расстоянии 6 м (*a*) и 19 м (б) от кровли. Указаны углы сколов пород по граням бортов

На геометрию поверхности кровли камеры и ее бортов существенно влияют такие факторы, как вид напряженно-деформированного состояния массива, определяемый соотношением (1); близость расположения смежных горных выработок; отклонение взрывных скважин от вертикали при бурении; наличие процесса зональной дезинтеграции горных пород.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФОРМ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ КАМЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПОСЛЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

В настоящее время контроль поверхности подземных камер рудника основан на проведении ее визуального осмотра маркшейдером [1–4]. При таком подходе оценка форм и геометрических размеров образующихся после взрывных работ обнажений является достаточно субъективной. Инструментальные наблюдения за состоянием формирующейся внутренней поверхности камеры могут проводиться методом лазерного сканирования, при этом трехмерная модель камеры (см. рис. 2) позволяет определять существенно бо́льший набор значимых угловых и размерных параметров ее поверхности, относящихся к характеристике реального состояния обнажений пород, а в режиме мониторинга — фиксировать их изменения во времени. 190 Компьютерная обработка данных сканирования может распознавать локальные геометрические размеры визуализируемых сечений, углы наклона поверхности отрабатываемых участков камеры; выбирать расстояния между сечениями; аппроксимировать экспериментальные данные в плоскости окружностями или другими кривыми, построенными для выбранных сечений камеры; характеризовать сопряжения бортов и кровли, кривизну поверхности в целом и ее распределение по контурам сечений. В этой связи применен метод количественной обработки сканированной информации, основанный на использовании эффектов зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок и свойств канонической шкалы иерархических представлений структурных отдельностей в массиве [15, 16].

Определение образующихся после взрыва и в процессе выгрузки руды форм поверхности камеры по данным сканирования основано на построении аппроксимирующих окружностей и кривых второго порядка по характерным контурам и точкам сечений на соответствующих вертикальных поперечных, вертикальных продольных и горизонтальных в плане разрезах поверхности камеры (см. рис. 2). Контур каждого сечения разбивают на дуги, фрагменты которых по форме близки к секторам вписываемых окружностей, или выбирают точки, по которым выполняют графические построения окружностей по методу трех точек радиусами соответствующей кривизны. Метод такого выделения фрагментов дуг на контуре сечения и построения окружностей на каждом из них показан на рис. 6a. Построения демонстрируют высокую точность метода. Например, радиус окружности, определенный по участку кровли длиной 4 м и прогибом 0.5 м, совпадает с соответствующим фрагментом дуги по контуру сечения с относительной точностью 2%.

Аппроксимация сканированной поверхности окружностями может также осуществляться аналитически по методу наименьших квадратов [17], а в более общем случае — кривыми второго порядка (эллипс, парабола, гипербола). Метод аналитического определения размерных параметров форм поверхности камеры по точкам сканирования приведен ниже.

Известно [18], что кривые второго порядка в системе координат (x, y) записываются в виде

$$ax^{2} + 2bxy + cy^{2} + 2dx + 2ey + 1 = 0,$$
(2)

где *a*, *b*, *c*, *d*, *e* — коэффициенты, которые требуется определить.

При подстановке экспериментальных точек из сечений сканированной поверхности с координатами (x_i, y_i) в левую часть уравнения (2) при условии, что они не обязательно лежат на кривой второго порядка, получим

$$ax_i^2 + 2bx_iy_i + cy_i^2 + 2dx_i + 2ey_i + 1 = \delta_i, \qquad (3)$$

-)

где δ_i — некоторые отклонения от кривой (2); i = 1, 2, ..., n (n — количество точек).

Сумма соответствующих отклонений по всем экспериментальным точкам может быть минимизирована методом наименьших квадратов:

$$F(a, b, c, d, e) = \sum_{i=1}^{n} (ax_i^2 + 2bx_iy_i + cy_i^2 + 2dx_i + 2ey_i + 1)^2 \to \min.$$
(4)

Решение (2) относительно искомых неизвестных (a, b, c, d, e) имеет вид

$$\begin{pmatrix} a \\ 2b \\ c \\ 2d \\ 2e \end{pmatrix} = - \begin{vmatrix} \frac{\overline{x^4}}{x^3y} & \frac{\overline{x^3y}}{x^2y^2} & \frac{\overline{x^2y^2}}{xy^3} & \frac{\overline{x^2y}}{x^2y} & \frac{\overline{x^3}}{x^2y} & \frac{\overline{x^2y}}{xy^2} \\ \frac{\overline{x^3}}{x^2y} & \frac{\overline{xy^3}}{x^2y} & \frac{\overline{y^4}}{x^2y} & \frac{\overline{xy^2}}{x^2} & \frac{\overline{y^3}}{x^2} \\ \frac{\overline{x^3}}{x^2y} & \frac{\overline{x^2y}}{xy^2} & \frac{\overline{xy^2}}{y^3} & \frac{\overline{x^2}}{x^2} & \frac{\overline{xy}}{xy} \end{vmatrix} - \left[\cdot \begin{pmatrix} \frac{x^2}{\overline{xy}} \\ \frac{\overline{x}}{\overline{y}} \\ \frac{\overline{x}}{\overline{y}}$$

191

где
$$\overline{x^k y^j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k y_i^j$$
; k, j=0, 1, 2, 3, 4.

Введя обозначения

$$\Delta = \det \begin{pmatrix} a & b & d \\ b & c & e \\ d & e & 1 \end{pmatrix}, \ \delta = ac - b^2, \ S = a + c,$$

в результате имеем три случая: 1) если $\delta = 0$ и $\Delta \neq 0$, то искомая кривая (2) является параболой; 2) если $\delta > 0$ и $\Delta \neq 0$, $\Delta S < 0$, то искомая кривая (2) — эллипс; 3) если $\delta < 0$ и $\Delta \neq 0$, то искомая кривая (2) — гипербола.

По точкам на отрезках кривых, выделенных в сечениях камеры по горизонтали, а также продольных и поперечных — по вертикали, построены и рассчитаны радиусы 120 аппроксимирующих окружностей и проведено их упорядочение в шкале канонических представлений [16, 19]. Дуга каждой аппроксимирующей окружности с достаточной точностью вписывается в отрезок кривой соответствующего сечения камеры.

Значения радиусов аппроксимирующих окружностей, определенные в сечениях камеры, приведены в табл. 2, а значения канонической шкалы и количество радиусов, совпадающих со значениями этой шкалы или отклоняющихся не более 10% от них, — в табл. 3; на рис. 6*б*, *в*, *е* показано положение окружностей, построенных в сечениях камеры и сгруппированных по соответствующим ее проекциям. Количество окружностей, радиусы которых практически точно совпадают со значениями канонической шкалы, составляет 64%. Это свидетельствует о том, что сформирован ряд зон дезинтеграции, согласующийся с радиусом ядра Земли [15, 16].



Рис. 6. Пример определения радиусов аппроксимирующих окружностей по методу трех точек в сечении камеры (*a*): расположенных по группам вертикальных поперечных (δ), вертикальных продольных (s) и горизонтальных (z) в плане сечений

Поперечные S _i и продольные P _i сечения камеры через 2 м													
Номер	S_1	S_2	S ₃	S_4	S_5	Номер	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
1	2.4	14.3				1	1.1	7.3	24.8				
2	18.1	24.5	25.2			2	1.8	14.2	35.0		—		
3	4.8	19.2				3	3.7						_
4	27.9					4	18.6	20.5	20.5	53.3			
5	4.5	12.5				5	3.6	4.8	24.9	24.9	25.0		
6	2.6	9.0				6	5.0	17.9	25.4				
7	1.3	3.4	3.9	6.4	20.9	Сечения по высоте через 5 м от верха кровли							
8	5.0	6.9	18.9	19.2		1	1.1	1.7	1.8	1.8	2.2	3.3	4.3
9	2.2	6.6	25.1			2	2.4	17.2	58.5		—		
10	2.1	8.9	10.3			3	4.4	6.4	6.6	13.6	20.6	20.9	
11	1.1	2.5	3.6	4.5		4	1.3	2.3	9.3		—		
12	10.4	17.2	19.2			5	19.0						
13	9.9	38.1											
14	20.4	26.1		_				_		_			

ТАБЛИЦА 2. Радиусы аппроксимирующих окружностей, определенные по сечениям камеры 1, СЗУ, гор. – 210 м, блок № 13

ТАБЛИЦА 3. Распределение радиусов аппроксимирующих окружностей в канонической шкале иерархических представлений, определенных по сечениям камеры 1, СЗУ, гор. – 210 м, блок № 13

Номер в каноничес- кой шкале	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Числовое значение, м	53.95	38.15	26.97	19.07	13.49	9.54	6.74	4.77	3.37	2.38	1.69	1.19
Количество, шт.	2	2	10	16	4	6	6	8	5	8	5	5

В целом, построения показывают, что окружности, концентрически очерчивающие рельеф камеры, встречаются, но не являются доминирующими. В основном они имеют радиусы, сопоставимые или превышающие соответствующие линейные размеры камер, что свидетельствует о возможном формировании зон дезинтеграции в окрестном массиве.

Таким образом, положение и размеры аппроксимирующих окружностей, подтверждающих возможное развитие зонально-дезинтеграционных процессов в окрестности камеры, позволяют выделить эпицентры вероятных зон разрушений пород в массиве и характеризуют его как "проблемный". Данный факт следует учитывать при подготовке и ведении горных работ.

В каждом из сечений на рис. 6*б*, *в*, *г* наблюдаются "плавные переходы" между смежными окружностями разных диаметров, что указывает на приближение формы поверхности камеры к эллипсоидной (более обще — кривой второго порядка).

В соответствии с рис. 2 по точкам сечений внутренней поверхности камеры построены и определены также размеры (радиусы полуосей) эллипсов, наиболее точно совпадающих с контурами рельефа: на рис. 7 показано положение эллипсов на продольных и поперечных по вертикали и горизонтальных в плане сечениях камеры; в табл. 4 приведены числовые значения их полуосей для 25 сечений, в табл. 5 — значения шкалы и количество совпадающих с ней размеров малых R_x и больших R_y радиусов полуосей выделенных эллипсов.



Рис. 7. Положение аппроксимирующих эллипсов по группам вертикальных продольных (*a*), вертикальных поперечных (б) и горизонтальных (*в*) в плане сечений камеры

Попереч	ные сечения ч	через 2 м	Продольные сечения через 2 м				
Номер	R_{x}	R_y	Номер	R_{x}	R_y		
1	7.12	13.2	1	17.4	29.6		
2	7.55	14.7	2	19.0	26.6		
3	9.09	16.0	3	19.8	32.2		
4	8.64	17.3	4	20.4	34.6		
5	7.43	16.8	5	21.2	29.7		
6	7.61	12.4	6	17.9	35.3		
7	7.20	11.7	Сечения	я по высоте	через 5 м		
8	6.45	10.9	1	7.95	15.4		
9	7.57	10.0	2	7.85	15.8		
10	6.50	9.6	3	7.33	16.6		
11	5.95	9.6	4	9.31	17.1		
12	6.59	11.1	5	8.45	17.5		
13	9.70	15.7					
14	5.72	13.5	—	—	—		

ТАБЛИЦА 4. Размеры полуосей аппроксимирующих эллипсов, определенных по сечениям камеры 1, СЗУ, гор. –210 м, блок № 13

ТАБЛИЦА 5. Распределение радиусов аппроксимирующих эллипсов в канонической шкале иерархических представлений, определенных в сечениях камеры 1, СЗУ, гор. –210 м, блок № 13

Номер в канонической шкале	32	33	34	35	36	37
Числовое значение, м	38.15	26.97	19.07	13.49	9.54	6.74
Количество, шт.	1	2	7	4	7	6

Количество эллипсов, оси которых совпадают или отличаются в пределах 10% от значений канонической шкалы, составляет 54% (см. табл. 4, 5). На соответствующих проекциях камеры видно (см. рис. 7), что ряд эллипсов расположен концентрично, при этом очерчивающие эллипсы практически не выходят за пределы проектного контура камеры. Согласование зон де-

зинтеграции [9], образующихся по концентрическим окружностям вокруг подземной камеры, связано с формированием профиля ее поверхности, приближающегося к эллипсовидной форме, и показывает возможность поддержания кровли междукамерными целиками. Представленные построения позволяют фиксировать развитие зон дезинтеграции в окрестном массиве относительно камеры и использоваться для оценки отклонения реальных размеров ее поверхности от проектной, а также определять форму камеры как круговую или эллиптическую.

выводы

Представлен графоаналитический метод определения форм поверхности подземной камеры, образованной взрывами зарядов ВВ при отбойке руды в напряженном массиве горных пород блочно-иерархического строения в условиях рудника "Таштагольский". Метод основан на использовании данных лазерного сканирования, позволяет определить линейные и угловые параметры подземной камеры в целом и кровли в частности, установить характер ее поверхности, приближающийся в соответствующих сечениях к круговой или эллипсовидной форме. Результаты построений показывают, что наибольшее влияние на формирование свода камеры и ее бортов оказывает, наряду с напряженным состоянием породного массива, его блочно-иерархическое строение.

Для описания форм отдельных участков поверхности предложен метод графоаналитической аппроксимации измерений координат границ камеры в ее сечениях с помощью кривых второго порядка, включающих окружности и эллипсы, радиусы которых канонически связаны с проявлением эффектов зональной дезинтеграции в окрестном массиве. Представленные построения позволяют оценивать развитие дезинтеграционных процессов в массиве относительно камеры и могут использоваться для определения отклонений ее реальной поверхности от круговой или эллиптической формы.

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам Таштагольского рудника за содействие в организации и проведении экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1. Указания** по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам. Новокузнецк, 2015. 73 с.
- 2. Шрепп Б. В., Мозолев А. В., Бояркин В. И. и др. Напряженно-деформированное состояние массива в зоне очистной выемки // Горн. журн. — 1979. — № 12. — С. 41-43.
- **3.** Фрейдин А. М., Неверов А. А., Неверов С. А. Подземная разработка рудных месторождений / под ред. В. Н. Опарина. Ч. 1. Новосибирск: ИГД СО РАН-НГУ, 2012. 208 с.
- 4. Юшкин В. Ф., Климко В. К., Чиглинцев В. А., Штирц В. А., Рублев Д. Е. Формирование кровли подземной камеры рудника "Таштагольский" после массового взрыва // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. ХХ Всерос. конф. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. С. 404–409.
- 5. Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А. Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 6. — С. 784–787.
- 6. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. Ш // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 10–39.
- 7. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел (термофлуктуационный механизм) // Вестн. АН СССР. 1968. № 3. С. 46-52.

- 8. Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н. и др. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН СССР. — 1986. — Т. 289. — № 5. — С. 1088-1094.
- 9. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 278 с.
- **10. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. 1996. № 4. С. 3–39.
- **11. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. и др.** Волны маятникового типа. Ч. III: Данные натурных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5. — С. 3–27.
- 12. Опарин В. Н., Середович В. А., Юшкин В. Ф., Прокопьева С. А., Иванов А. В. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 5. — С. 102–112.
- **13.** Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. Новосибирск: Наука, 2010. 404 с.
- 14. Опарин В. Н., Аршавский В. В., Жигалкин В. М., Симонов Б. Ф., Тапсиев А. П., Юшкин В. Ф. Особенности разрушения одномерной модели блочных сред при длительном одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2002. — № 4. — С. 10–32.
- **15.** Курленя М. В., Опарин В. Н. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомарно-ионных радиусов // ФТПРПИ. 1996. № 2. С. 3–13.
- **16. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г.** О новой шкале структурноиерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5. — С. 16–33.
- **17. David Eberly.** Least squares fitting of data. Cleaned: July, 15, 1999. 12 р. Сайт: http://www.geometrictools.com/Documentation/LeastSquaresFitting.pdf.
- 18. Постников М. М. Аналитическая геометрия. М.: Наука, 1973. 754 с.
- **19.** Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. Новосибирск: Наука, 2011. 259 с.

Поступила в редакцию 28/VI 2017