

УДК 622.233

А.А. Козырев, В.В. Тимофеев, К.Н. Константинов
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО
СКАНИРОВАНИЯ

Семинар № 2

Основная масса инструментальных методов оценки напряженного состояния, свойств и удароопасности горных выработок, применяемых в настоящее время на подземных рудниках, предполагает бурение контрольных скважин. Это влечет значительные дополнительные трудозатраты и снижение безопасности работ особенно в выработках большого сечения. Разработанный в Горном институте Кольского научного центра комплекс «КРВ-Лазер» и метод контроля разрушения выработок (КРВ) позволяют сканировать сечения горных выработок и использовать эти данные для оценки состояния пород [1].

Комплекс «КРВ-Лазер» представляет собой переносной прибор на основе лазерного измерителя расстояний Leica DISTO™ (Leica Geosystems AG®, Швейцария), предназначенный для дискретного сканирования сечений горных выработок и

других полостей в произвольной заданной плоскости.

Прибор устанавливается в выработке на треноге и определяет расстояния от точки установки до стенки выработки. Внешний вид, пример сканирования и характеристики прибора приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Комплекс представляет собой упрощенный по сравнению с известными автоматическими сканерами [11], доступный для рудничных служб контроля удароопасности вариант лазерного сканера.

Показания дистометра могут фиксироваться вручную или передаваться с помощью радиоинтерфейса в портативный компьютер. Полученные расстояния обрабатываются с помощью электронных таблиц, специальной программы «MineProfile» и пакета программ AutoCAD® (AUTODESK Inc.) В результате обработки получают аппроксимированные сечения, на основе которых может быть построена

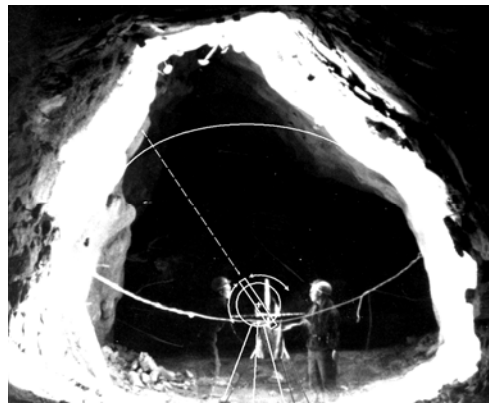
Таблица 1

Технические характеристики комплекса «КРВ-Лазер»:

Точность измерений	±1,5 -3 мм
Диапазон измерений	0,2 - 200 м
Время измерения	0,5 - 4 сек
Угловой шаг сканирования в вертикальной плоскости, град	1, 5
Установка платформы под углом к горизонту с точностью, град	5
Дискретность оценки угла наклона контрольных скважин, град	2
Вес со штативом	3 - 5 кг



а)



б)

Рис. 1. Измерительный блок «КРВ-Лазер» (а), сканирование и фотосъемка контура разрушающейся выработки (б) в высоконапряженном массиве подземного рудника

плоская или объемная модель поверхности выработки, определена степень её удароопасности, получены параметры разрушения и их временные изменения. Экспериментальная проверка аппроксимации отсканированной полости объемной моделью показала, что погрешность не превышает 1-2 %. Положение сканера в выработке привязывается к рудничной маркшейдерской сети.

Измерение параметров разрушения выработок велось Горным институтом КНЦ РАН на апатитовых и других рудниках Кольского полуострова в течение более 20 лет, сначала с помощью фотопланиметрии, а с 2002 года на основе лазерного сканирования. Замена фотосъемки на лазерное сканирование позволила повысить точность с нескольких сантиметров до 2–3 мм, ускорить и упростить процедуру обработки информации, однако при этом увеличилось время самой съемки, что является негативным при работе в удароопасных условиях. На рис. 1 показана съемка обоими методами. Основной объем наблюдений был выполнен для выработок

диаметром до 3–4 м (более 200 сечений), а также для выработок диаметром 4–8 м (более 100 сечений). Пример аппроксимированного сечения приведен на рис. 2. Эффект дополнительного разрушения выработок (по сравнению с примененным паспортом буровзрывных работ) был отмечен в массивах с повышенными (тектоническими) напряжениями [2–6] и объясняется двумя причинами: взаимодействием динамических и статических напряжений при взрывном способе проходки выработки и длительным воздействием сконцентрированных на контуре статических напряжений, действующих в нетронутом массиве и дополнительно увеличивающихся в зоне влияния очистных работ. В пользу последнего из упомянутых механизмов говорит зафиксированная при повторном сканировании незакрепленных выработок переориентация максимума разрушения и образование дополнительного объема зоны при отбойке вышележащих секций на Расвумчоррском руднике ОАО «Апатит». На рис. 3 показаны параметры характерной зоны разрушения

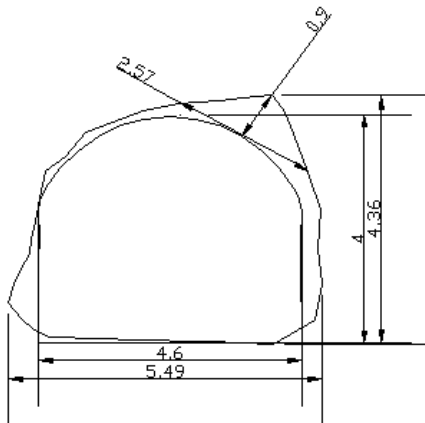
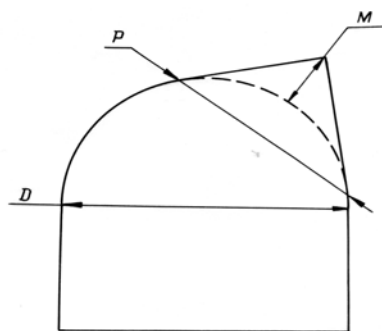


Рис. 2. Пример отсканированного реального сечения выработки совмещенного с проектным (4x4,6 м)

выработки при действии высоких напряжений, где: M – глубина зоны разрушения, P – ширина зоны разрушения, D – диаметр (ширина, высота) выработки, m .

Анализ данных для выработок с проектной площадью от 8 до 21 m^2 показал, что реальные сечения в условиях повышенных напряжений, как правило, превышают проектные (перебор), (см. табл. 2, рис. 4) причем отношение их площадей доходит в некоторых случаях до 1,9, а отношение площади разрушенной зоны к реальной площади сечения выработок находится в пределах 0,02–0,16 (рис. 5). Параметры зон разрушения



составляют в среднем $M_{ср} = 0,7$ м, $P_{ср} = 2,4$ м.

Если предположить, что зона разрушения несет информацию о дополнительной энергии, реализованной при действии всей совокупности напряжений, то по реальным параметрам разрушения можно попытаться оценить величину критической энергии $W1$, затраченной при разрушении реального объема пород. По данным [7] удельную критическую энергию при одноосном напряженном состоянии массива можно оценить как

$$W1 = \sigma_{сж}^2 / 2E,$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, E – динамический модуль Юнга.

При разрушении выработок и скважин напряженное состояние у контура является двухосным, переходящим при удалении от контура в неравнокомпонентное трехосное. В этом случае прочность пород увеличивается по данным разных авторов [6-8] в 2–4 раза. Для усредненных данных по хибинским породам [7] с учетом объемности допустим, что $W1 = 2 \div 8 \sigma_{сж}^2 / E = 1,1 \div 4,3 \cdot 10^6$, Дж/ m^3 .

С учетом данных табл. 2 получим среднюю удельную критическую энергию дополнительного разрушения на погонный метр выработок с проектной площадью 8-20 m^2

$$W2 = W1 \cdot S2_{ср} = 1,3 \div 4,9 \cdot 10^6, \text{ Дж/м.}$$

Оценка энергии разрушения для участков массива с пройденными выработками может быть оценена по

Рис. 3. Оцениваемые параметры разрушения контура выработки



Рис. 4. Гистограмма отношения реальных и проектных площадей сечений выработок

суммарной протяженности зон разрушения L1, м как

$$W3 = W2 \cdot L1, \text{ Дж}$$

Такой расчет был выполнен для поэтажных выработок блока-целика Кировского рудника ОАО «Апатит». На начало 1990 года на буроподсечном горизонте блока-целика по наблюдениям в выработках были зафиксированы разрушения контура выработок на протяжении L1 = 870 м. Суммарная энергия этих разрушений составляет

$$W3 = W1 \cdot K \cdot K1 \cdot L1 \cdot S0, \text{ Дж},$$

где S0 = 8,56 м² для указанных выработок.

С учетом данных табл. 2

$$W3 = 8 \div 30 \cdot 10^8 \text{ Дж}.$$

По отношению к объёму массива, включающему эти выработки (взяты слой 300x100x21 м, зона влияния выработки принята равной плюс-минус

трем её диаметрам), удельная критическая энергия разрушения составляет 1,2 ÷ 4,7 · 10³ Дж/м³. Для сравнения с динамическими проявлениями горного давления был выполнен анализ сейсмичности в

этом районе по данным Центра геофизического мониторинга ОАО «Апатит». Так как сейсмический мониторинг дает относительно высокую погрешность по координатам, сравнивались удельные (относительно объема) энергии. В этом районе за предшествующие анализу разрушений выработок два года произошло 545 сейсмических событий с энергиями от 10² до 10⁵ Дж. Выделившаяся средняя удельная сейсмическая энергия из блока 300x100x100 м с разрушенными выработками составила 0,44 Дж/м³. Таким образом, соотношение удельных сейсмической энергии и энергии на дополнительное разрушение выработок составило около 0,01 ÷ 0,04 %. Эти данные не противоречат мнению авторов [9], которые считают, что «сейсмический коэффициент полезного действия» в виде от-

Таблица 2

Статистические параметры проектных и реальных выработок по данным лазерного сканирования

Статистический показатель	Параметры сечения выработки		
	K1 = S1 / S0	S2, м ²	K = S2 / S1
Минимум	0,99	0,11	0,01
Максимум	1,89	3,42	0,15
Среднее	1,34	1,15	0,06
Станд. отклонение	0,22	0,83	0,04

где S0 – площадь проектного сечения выработки, м², S1 – площадь реального сечения выработки, м², S2 – площадь разрушенной зоны, м²

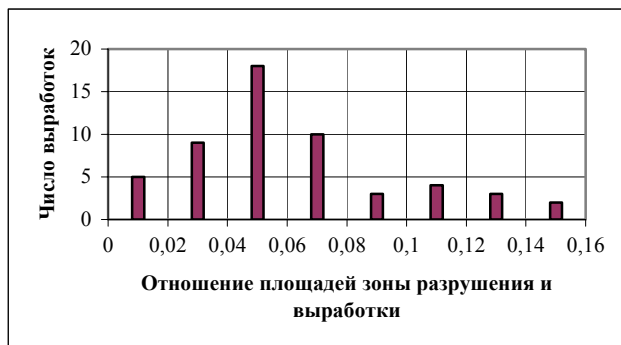


Рис. 5. Гистограмма отношения площадей разрушенной зоны и реальной выработки

ношения сейсмической энергии к потенциальной, необходимой для горного удара составляет десятые доли процента. Основная часть критической энергии разрушения реализуется, по всей видимости, при взрывных работах в процессе проходки выработок и отбойке руды в близлежащих блоках. При мониторинге сейсмичности часть сейсмических событий при этом не регистрируется из-за большой частоты их возникновения, что, соответственно, занижает указанное соотношение.

С помощью комплекса «КРВ-Лазер» можно производить оценку удароопасности горных выработок. Для хибинских апатитовых месторождений характерны горизонтальные тектонические напряжения в метротом массиве в диапазонах 25–70 МПа во вмещающих породах и 15–50 МПа в рудах [12]. Практически для хибинских месторождений разрушение стенок выработок начинается при условии превышения максимальными нормальными напряжениями за счет концентрации половины предела прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{\max} \geq 0,5\sigma_{\text{сж}}$. Если выработка имеет характерное разрушение кровли в виде шатра, связанное с действием высоких горизонтальных напряжений, то на основе отсканированного сечения можно установить, какой объем

породы был разрушен за счет повышенных напряжений.

На основе установленных параметров сечения рассчитывается относительная величина площади зоны разрушения:

$$K = S2 / S1 = 1,124 \cdot P(0,5M - 0,08D + 0,08\sqrt{D^2 - P^2})/D^2$$

где D – диаметр выработки (рис. 3). Более надежный метод определения площадей S1 и S2 – с помощью инструмента «замкнутая полилиния» в системе AutoCAD™. При оценке удароопасности используется также L – протяженность зоны разрушений от высоких напряжений вдоль оси выработки. Учет протяженности зоны разрушений связан с тем, что ситуация становится более опасной при увеличении объема участка массива пород, захваченного высокими напряжениями и увеличением накопленной потенциальной энергией. На основе значений K и L по номограмме (рис. 6) определяют удароопасность выработки.

При попадании параметров разрушения выше приведенной линии выработка относится к опасной категории. Оценка относится ко всему участку разрушения выработки.

Аппроксимирующая функция номограммы:

$$K = 0,059 - 0,024 \cdot L/D + 0,003(L/D)^2 \text{ при } L/D < 3$$

$$K = 0,014 \text{ при } L/D \geq 3$$

На основе сопоставления с оценками удароопасности по дискванию

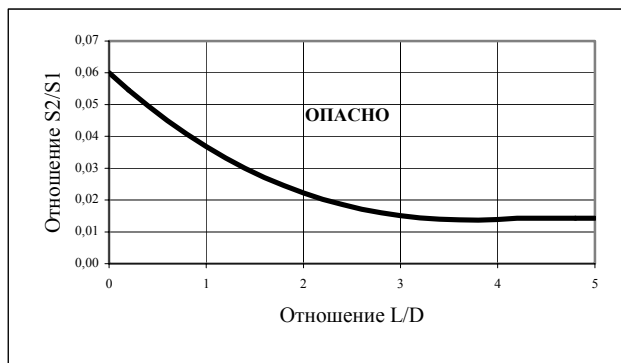


Рис. 6. Номограмма для оценки категории удароопасности по разрушению контура горных выработок

характеризует предшествующее креплению геомеханическое состояние.

Оценка удароопасности по утвержденным для хибинских апатитовых рудников методикам [10] предполагает использова-

ние параметра «диаметр выработки». Однако в случае реальных выработок со сложными сечениями использование этого параметра не всегда является обоснованным. Поэтому во всех случаях оценки удароопасности в выработках рекомендуется производить съемку сечения выработки в створе контрольных скважин с помощью прибора «КРВ-Лазер» и использовать в качестве параметра «диаметр выработки» реальный поперечный размер выработки в направлении, ортогональном оси максимального разрушения или диаметр круга с площадью, равной площади реального сечения. При сканировании выработки можно отметить положение устьев контрольных скважин, измерить угол их наклона и длину и получить схему реальной измерительной станции.

В работах по испытанию метода контроля разрушения выработок на основе лазерного сканирования активное участие принимали сотрудники служб прогноза и профилактики горных ударов ОАО «Апатит», за что авторы приносят им свою благодарность.

керна и данными других методов для выработок с эффективным диаметром 3–4 м определена вероятность пропуска категории «опасно» по контролю разрушения выработок (КРВ) в пределах 5 %. Вероятность ошибочного отнесения неопасной выработки к более удароопасной составляет около 35 %. В некоторых случаях реальное сечение выработки существенно отличается от проектного и иногда трудно оценить, какая часть выработки разрушилась от действующих в массиве напряжений. В такой ситуации невозможно дать надежную оценку напряженного состояния и удароопасности пород около выработки. В этом случае необходимо дублировать оценку удароопасности другими методами. В отдельных случаях, при необходимости получения надежных данных о разрушении контура выработки, рекомендуется при проходке делать 2-3 отпала с точным соблюдением проектного сечения, желательно с применением контурного взрывания. Ограничением методики также является крепление выработки, т.к. в этом случае контур «запоминает» и

1. Тимофеев В.В. Технические и программно-методические средства мониторинга опасных состояний массивов горных пород хибинских апатитовых рудников. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2003. – с. 168 – 190.
2. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1977, 503с.
3. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука, 1978. 256 с.
4. Аксенов В.К., Курленя М.В., Липчанский Б.М., Пирля К.В. и др. Способ определения напряжений в массиве горных пород. Авт. Свидетельство №945431. Бюлл. Изобр. № 27, 1982.
5. Белов Н.И. Определение напряжений в массиве и степени его удароопасности по параметрам разрушения керна и ствола скважины, пробуренной в борту карьера. Сб. «Открыто-подземная разработка мощных рудных месторождений». Апатиты, изд. КНЦ РАН. – 1995, с. 105-110.
6. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Мальцев В.А. Прогноз и профилактика горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений с позиций нелинейной геодинамики // ФТПРПИ. – 2001. - № 4.
7. Механика горных пород при высоких давлениях. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. – М.: Наука, 1979. 152 с.
8. Сейсмические опасности. Тематический том. / Под. Ред. Г.А.Соболева. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2000. 296 с.
9. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (хибинские апатито-нефелиновые месторождения) (Открытое акционерное общество «АПАТИТ»).- Апатиты.: Изд. КНЦ РАН, 2002.-97 с.
10. Evaluating Rock Faces with 3D Laser Scanning. By Bruce Jenkins, Senior Analyst. Presentations by Dr. John Kemeny and others will be featured in a geotechnical track at SPAR 2007: Capturing and Documenting Existing-Conditions Data for Design, Construction and Operations, March 26-27, Houston, TX.
11. Сейсмичность при горных работах. / Коллектив авторов – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2002. – 325 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Козырев А.А. – профессор, доктор технических наук, зам. директора по научной работе,
 Тимофеев В.В. – ст. научный сотрудник, кандидат технических наук.
 Константинов К.Н. – мл. научный сотрудник,
 Горный институт Кольского научного центра РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2008».
 Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Л. Шкуратник.

