

УДК 622.02

**ОСНОВЫ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ЭМИССИИ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ**

**С. Д. Викторов, А. А. Осокин, А. В. Шляпин**

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,  
E-mail: Shlyapin@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Проведен анализ существующих методов прогнозирования катастрофических явлений, основанный на мониторинге напряженно-деформированного состояния массива горных пород, сейсмических и электромагнитных эффектов, на горных предприятиях, ведущих добычу минерального сырья подземным способом в России и за рубежом. Установлено явление эмиссии субмикронных частиц в горных породах и разработана ее физическая модель при одноосном сжатии образцов горных пород. Сделаны выводы о создании принципиально нового метода и аппаратно-технической базы для прогнозирования катастрофических явлений при ведении подземных горных работ.

*Горная порода, разрушение, прогноз, катастрофические явления, субмикронные частицы, эмиссия, горные удары, напряженно-деформированное состояние*

DOI: 10.15372/FTP/20170520

Развитие горнодобывающей отрасли в России сопряжено с необходимостью разработки месторождений в сложных горно-геологических условиях, на больших глубинах, с высокой природной газоносностью пластов, значительной сопротивляемостью пласта резанью, наличием пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, а также в удароопасных регионах [1–3]. Проведенные исследования показали, что основная внешняя причина природного характера возникновения катастрофических событий при добыче полезных ископаемых подземным способом — это проявление динамической формы горного давления, которое повышается с увеличением глубины разработки месторождения.

Наиболее опасной динамической формой горного давления является “горный удар”, который возникает в результате преобразования потенциальной энергии внутри массива в кинетическую и сопровождается обильными выбросами руды, угля, соли и других пород, их обрушением, сильными звуковыми эффектами и образованием ударной волны. При этом происходит динамическое неравномерное перераспределение горного давления, что служит причиной возникновения катастрофических событий. Считается, что в 80–90 % случаев горные удары спровоцированы взрывными работами. Также они могут быть вызваны техногенными воздействиями на горный массив, например ослаблением и разрушением крепи, перемещением горного оборудования. В угольных шахтах проявление горного давления сопровождается “выдавливани-

ем” метана из угольных пластов и резким изменением состава рудничной атмосферы, что в совокупности с разрушением технического оборудования или нарушением технологии ведения горных работ приводит к катастрофическим последствиям.

Существующие методы прогнозирования катастрофических явлений, аппаратная база и системы информационно-коммуникационного оборудования, применяемые при добыче полезных ископаемых [4–8], показали, что большинство методов направлено на регистрацию горного давления и наблюдение за напряженно-деформированным состоянием (НДС) горного массива. На основе анализа мирового опыта прогнозирования таких событий на горных предприятиях, ведущих добычу минерального сырья подземным способом, можно сделать вывод о необходимости комплексного подхода с учетом двух и более способов (систем) контроля НДС.

В ИПКОН РАН проведены исследования явления отрыва фрагментов горной породы от поверхности обнажения, что происходит при высокой внутренней энергии геоматериала [9–12]. В масштабе макроразрушения оно хорошо известно как явление “стреляния” и “шелушения” горных пород со стенок горных выработок, а в микромасштабе — как фрактоэмиссия — сдвиг и отрыв микро- и наноструктурных фрагментов [13–15].

На рис. 1 представлена модель запредельного деформирования и разрушения поверхности цилиндрической полости при одноосном сжатии ( $\sigma$ ) породы, разработанная в [16]. Согласно этой модели, в зонах с максимальными сжимающими напряжениями геоматериал находится в запредельном деформировании, происходит его дезинтеграция и, как следствие, образование свободных частиц.

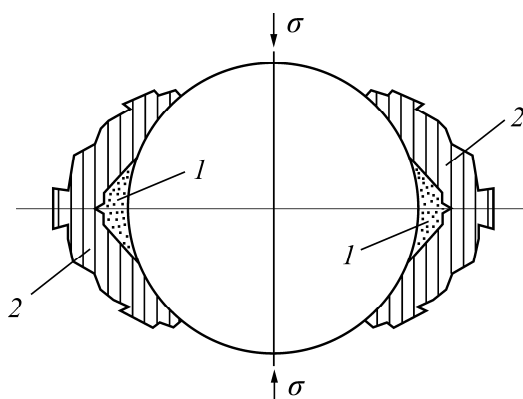


Рис. 1. Модель запредельного деформирования и разрушения поверхности цилиндрической полости при одноосном сжатии пород: 1 — область дезинтегрированной породы (источник свободных частиц); 2 — область частичной дезинтеграции породы

В [17] приведены результаты исследований, в которых кубические образцы гранита с цилиндрической полостью подвергались всестороннему неоднородному сжатию. Установлено, что в зонах с максимальными сжимающими напряжениями образуется система трещин и наблюдается отрыв тонких длинных чешуек. Вследствие дезинтеграции гранита в этих зонах сечение полости принимает вид, близкий к форме треугольника (рис. 2).

Согласно рис. 2а, в нижней и верхней частях контура цилиндрической полости, где действовали максимальные сжимающие напряжения, произошло его разрушение. Прямоугольником обозначена разрушенная область контура полости, которая в увеличенном масштабе представлена на рис. 2б. В этой области наблюдается ярко выраженная система микротрещин. Результаты исследований свидетельствуют о дезинтеграции образца гранита в области максимальных сжимающих напряжений, которая является потенциальным источником образования свободных частиц.

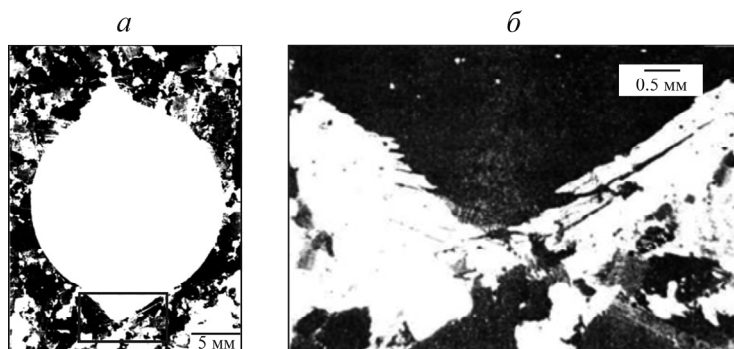


Рис. 2. Поперечное сечение цилиндрической полости в образце гранита после нагружения (а) и микроснимок контура этой полости (б)

На основе модели запредельного деформирования и разрушения поверхности цилиндрической полости при одноосном сжатии пород и предварительных исследований [9–17] установлено, что в области  $I$  (рис. 1) концентрируется максимальное напряжение сжатия, которое может стать причиной дезинтеграции и источником образования частиц различного уровня внутри изолированного объема в горной породе. В качестве этого объема выбрана сквозная цилиндрическая полость, с поверхности которой регистрируется образование субмикронных частиц. Сквозная цилиндрическая полость является важной особенностью разработанной теории и служит концентратором напряжений при оказании воздействия на участок горного массива. Поскольку эта полость — искусственная неоднородность “макромасштаба”, ее размеры можно задавать.

В [18] дано аналитическое решение задачи о влиянии круглого отверстия на распределение напряжений в пластине, подверженной одноосному растяжению, которое может быть применено к горным породам.

На рис. 3 показана механическая модель, лежащая в основе предложенного способа контроля. Образец со сквозной цилиндрической полостью в центре подвергнут одноосному сжатию ( $a$  — длина стороны образца,  $r$  — радиус полости,  $\theta$  — угол, относительно которого будут рассмотрены напряжения, действующие на контуре цилиндрической полости).

Согласно этому решению, на контуре полости имеем следующее: напряжение  $\sigma_\theta$  достигает максимального значения, когда  $\theta = 0$  или  $\theta = \pi$ , т. е. на концах  $m$  и  $n$  диаметра, перпендикулярного к направлению сжатия. В этих точках  $(\sigma_\theta)_{\max} = 3P$ , где  $P$  — величина сжатия образца. В данном случае максимальное сжимающее напряжение втрое больше постоянного напряжения  $P$ , приложенного к граням образца. В точках  $p$  и  $q$ , где  $\theta = \pi/2$  и  $\theta = 3\pi/2$ , получаем  $\sigma_\theta = -P$ .

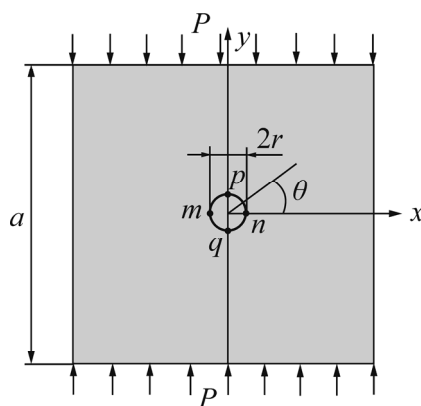


Рис. 3. Образец горной породы со сквозной цилиндрической полостью в условиях одноосного сжатия:  $m, n$  — зоны с максимальными сжимающими напряжениями;  $p, q$  — зоны с максимальными растягивающими напряжениями

Следовательно, в точках  $p$  и  $q$  действуют максимальные растягивающие напряжения. На контуре полости образуются зоны с максимальными сжимающими (вблизи точек  $m$  и  $n$ ) и растягивающими напряжениями (вблизи точек  $p$  и  $q$ ), которые являются потенциальными источниками образования микрочастиц.

В ходе проведения предварительных лабораторных исследований эмиссии микрочастиц образцы доломита, уррита и известняка подвергались одноосному сжатию гидравлическим прессом PR20P. Замеры осуществлялись в цилиндрической полости образцов счетчиком аэрозольных частиц Hand Held 3013 (Light House, США), позволяющим определять счетную их концентрацию в диапазонах от 0.3 до 5.0 мкм и обладающим высокой точностью измерений согласно требованиям IIS B 9921. Результаты измерений представлены на рис. 4, где фиксированные напряжения составляли 20, 50, 60 МПа для известняка, доломита и уррита соответственно.

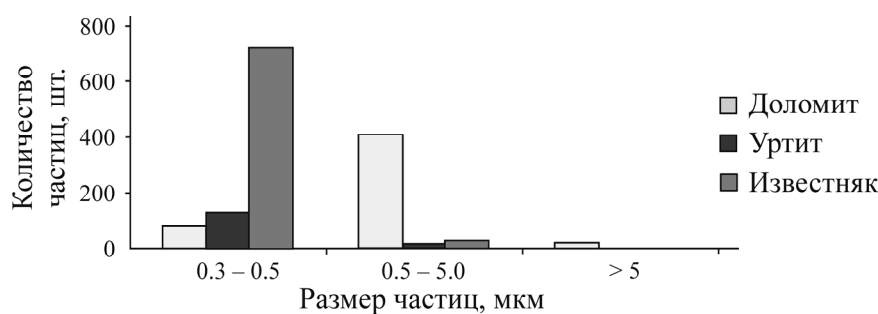


Рис. 4. Диаграмма эмиссии микрочастиц образцов доломита, уррита и известняка при напряжении сжатия 20, 50, 60 МПа соответственно

Как следует из рис. 4, для образцов известняка и уррита характерна эмиссия частиц размером 0.3–0.5 мкм, а для образцов доломита наибольший объем образовавшихся частиц находился в диапазоне 0.5–5.0 мкм.

Полученные результаты могут быть отнесены и к породным массивам, где начало процесса образования субмикронных частиц на поверхностях геоматериалов также будет свидетельствовать о переходе в состояние предразрушения на конкретном их участке.

Таким образом, можно заключить о возможности прогнозирования катастрофических явлений при добыче полезных ископаемых подземным способом путем создания новых и использования существующих аппаратно-технических средств количественной оценки эмиссии субмикронных частиц массива горных пород в рудничную атмосферу.

## ВЫВОДЫ

Сложные горно-технологические условия добычи полезных ископаемых подземным способом и постоянно изменяющееся напряженное состояние массива под воздействием техногенных и природных факторов приводят к непрерывному преобразованию во времени и пространстве горного массива. Анализ существующих методов прогноза катастрофических явлений на горнодобывающих предприятиях показал необходимость поиска новых методов мониторинга НДС массива горных пород.

Большое количество как природных, так и техногенных факторов, влияющих на формирование катастрофических событий, обуславливают необходимость комплексного подхода к их прогнозированию. Показано, что эмиссия субмикронных частиц горных пород при нагружении непосредственно связана с состоянием предразрушения.

Установлены новые количественные зависимости эмиссии частиц от нагружения образцов горных пород при одноосном сжатии, что может являться основой для создания аппаратной базы, позволяющей проводить анализ в реальном времени и определять состояние массива, близкое к катастрофическому, путем регистрации эмиссия субмикронных частиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Викторов С. Д., Галченко Ю. П., Одинцев В. Н. Техногенные минеральные частицы как проблема освоения недр // Вестн. РАН. — 2006. — Т. 76. — № 4. — С. 318–332.
2. Чантурия В. А., Трубецкой К. Н., Викторов С. Д., Бунин И. Ж. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. — М.: ИПКОН РАН, 2006. — 216 с.
3. Викторов С. Д. Образование субмикронных частиц при горном производстве и новый метод оценки катастрофических явлений // Вестн. РАН. — 2013. — Т. 83. — № 4. — С. 300–306.
4. Бобряков А. П., Крамаренко В. И., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О стрелянии горных пород // ФТПРПИ. — 1980. — № 5. — С. 3–12.
5. Опарин В. Н., Чугуй Ю. В., Поташников А. К., Плотников С. В. и др. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1 / отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 304 с.
6. Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Поляков А. Н., Мулев С. Н., Харкевич А. С., Панин С. Ф., Поляков Д. А. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт. — СПб.: ВНИМИ, 2012. — 83 с.
7. Панин В. И. Исследование закономерностей перераспределения полей напряжений при отработке глубоких горизонтов подземных рудников ОАО “Апатит” и разработка экспертных систем выбора технических решений по повышению безопасности и эффективности горных работ // Заключительный отчет по договору № 26107. — Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2012. — 30 с.
8. Дурове Ж. В., Хиж Ж. Прогноз и эффективное предотвращение горных ударов в угольных шахтах Словакии // Зап. Горного института. — 2012. — Т. 198. — С. 166–172.
9. Кудряшов В. В., Викторов С. Д., Кочанов А. Н. О распределении минеральных частиц по размерам при разрушении горной породы // ФТПРПИ. — 2006. — № 6. — С. 68–72.
10. Викторов С. Д., Кочанов А. Н., Александров П. А., Калечиц В. И., Шахов М. Н. Изучение микроструктуры и дисперсного состава горных пород после интенсивного динамического воздействия // Инж. физика. — 2010. — № 6. — С. 39–44.
11. Викторов С. Д., Кочанов А. Н., Одинцев В. Н., Осокин А. А. Эмиссия субмикронных частиц при деформировании горных пород // Изв. РАН. Сер. физическая. — 2012. — Т. 76. — № 3. — С. 339–341.
12. Викторов С. Д., Кочанов А. Н. Оценка условий образования и размеров микрочастиц при разрушающих воздействиях на горные породы // Вестн. Тамбов. ун-та. — 2013. — Т. 18. — С. 1685–1686.
13. Массалимов И. А., Уракаев Ф. Х. О возможности образования наноразмерных частиц в носке трещины // Физикохимия ультрадисперсных (нано) систем. — М.: МИФИ, 2002. — С. 46–47.
14. Одинцев В. Н. Отрывное разрушение скальных горных пород. — М.: ИПКОН РАН, 1996. — 166 с.
15. Уракаев Ф. Х., Массалимов И. А. Флуктуация энергии и эмиссионные явления в устье трещины // ФТТ. — 2005. — Т. 47. — Вып. 9. — С. 1614–1618.
16. Кузнецов С. В., Одинцев В. Н., Слоним М. Э., Трофимов В. А. Методология расчета горного давления. — М.: Наука, 1981. — 104 с.
17. Lee M., Haimson B. Laboratory study of borehole breakouts in lac du bonnet granite: a case of extensile failure mechanism, Int. J. Rock Mech. Mm. So. & Geomech, 1993, Vol. 30, No. 7. — P. 1039–1045.
18. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.