

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

С. Д. Викторов, А. Н. Кочанов

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

Разработаны методики и проведены экспериментальные исследования по изучению закономерностей образования субмикронных частиц при разрушении горных пород. В ходе экспериментов осуществлено взрывное воздействие на образцы горных пород или их деформирование в условиях одноосного сжатия с одновременным контролем размеров и количества частиц с помощью лазерной спектроскопии вплоть до разрушения. Установлено, что независимо от вида воздействия максимум в распределении субмикронных частиц приходится на частицы размером несколько микрон. Динамика образования частиц зависит от структурных свойств и величины напряжений для испытаний при сжатии. Отмечена перспективность проведенных исследований как для мониторинга экологической безопасности, так и возможного прогнозирования катастрофических явлений при ведении горных работ.

Субмикронные частицы, горная порода, разрушение, эксперимент, взрывное воздействие, одноосное сжатие, методика, лазерная спектроскопия, экология, прогноз

В настоящее время особое значение в исследованиях приобретают вопросы, связанные с изучением процессов, протекающих на микро- и наноуровнях в различных областях научных знаний, в том числе и изучение образования дискретных частиц, которые играют существенную роль во многих явлениях как природных, так и техногенных, определяющих движение и преобразование вещества в окружающей среде. Применительно к процессам горного производства исследования образования субмикронных частиц, размер которых менее ~ 10.0 мкм, изучение особенностей их распространения в атмосфере, оценка экологической опасности при ведении взрывных работ стали проводиться в ИПКОН РАН под научным руководством акад. К. Н. Трубецкого [1, 2].

Для изучения закономерностей образования субмикронных частиц и оценки их количественных показателей в условиях взрывного и квазистатического деформирования и разрушения образцов горных пород разработаны экспериментальные методики, в основе которых положена идентификация частиц с помощью лазерной спектроскопии в воздушной среде. Применение этого метода и соответствующих приборов (лазерных счетчиков) дает возможность оценить количество и распределение частиц по размерам в процессе деформирования и разрушения горных пород. Существует достаточно большое количество модификаций приборов, позволяющих контро-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №16-17-00066).

лизовать количество частиц в диапазоне размером от 0.1 до 10 мкм и более в объеме воздуха, прокаченного через измерительный объем за некоторый промежуток времени. Их действие основано на анализе и подсчете световых импульсов, рассеянных отдельными частицами с помощью лазерного луча, которые преобразуются затем в электрические импульсы с амплитудой, пропорциональной размерам частиц. Впервые метод лазерной спектрометрии в воздушной среде для решения аналогичных задач использован в Институте информационных технологий НИЦ “Курчатовский институт” при разрыве стальных стержней при испытаниях на растяжение [3].

При проведении экспериментов по взрывному воздействию, методика которых описана в [4], применялись специальные ампулы сохранения с размещением в них образцов горных пород размером 14×14×10 мм. Заряд ВВ состоял из четырех тротиловых шашек и устанавливался на крышку ампулы. Разрушение и дезинтеграция образцов осуществлялись под действием ударных волн, амплитуда которых могла достигать ~10 ГПа. В результате динамического сжатия, степень которого определяется амплитудой ударной волны, происходит дробление образца на микроблоки и затем его уплотнение. Эти ампулы позволяют сохранить исследуемые образцы горных пород, которые после прохождения ударных волн и кратковременного действия высокого импульсного давления представляют собой монолитную спрессованную порошкообразную массу.

Для оценки числа и размеров субмикронных частиц, образовавшихся после дезинтеграции образцов в результате прохождения ударных волн, порошкообразная масса образца, извлеченная из ампулы сохранения после взрывного воздействия, помещалась в стальную кювету, закрепленную на излучателе ультразвукового диспергатора типа УЗДН-2Т. При воздействии ультразвуковой волны частицы исследуемого порошка поднимались в воздух, вместе с которым попадали на вход лазерного счетчика частиц Lighthouse Hand Held 3016, контролирующего количество частиц в рабочих диапазонах прибора 0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 мкм. Нижний порог измерений размеров частиц 0.3 мкм определяется техническими возможностями приборов данного класса. Некоторые результаты исследований в виде данных распределения минеральных субмикронных частиц в процентном соотношении от общего их количества для всех исследованных пород приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Распределение субмикронных частиц по размерам после взрывного воздействия, %

Горная порода	Характерный размер субмикронных частиц, мкм					
	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0
Мрамор	5.5	5.3	3.4	13.4	43.5	28.9
Змеевик	6.0	4.9	3.8	12.1	41.8	31.4
Гранит	10.0	15.4	44.6	25.4	4.6	0.0
Известняк	10.5	19.6	41.4	20.0	8.1	0.4
Яшма	18.6	26.5	35.2	13.6	5.7	0.4
Доломит	7.8	4.9	17.9	40.2	29.2	—

Установлено, что процентное содержание минеральных частиц размером 0.3–0.5 мкм для образцов мрамора, змеевика, гранита, известняка, доломита составляет ~10–25 % от их общего количества в рассматриваемом диапазоне размеров, а преобладают частицы 1–5 мкм. Для яшмы характерно образование частиц размером менее 1 мкм и более крупных примерно в равном количественном соотношении. Полученное распределение микрочастиц может быть объяснено с позиции увеличения прочности частиц с уменьшением их размеров [5]. Одним из факторов минерального состава, обуславливающего образование субмикронных частиц, является содержание кварца, склонного к хрупкому разрушению. Однако механизм и условия образования

частиц обусловлены не только действием высоких импульсных давлений на границе заряд–порода, но также могут быть связаны с общей фрагментацией, образованием новых поверхностей при развитии трещин, в том числе за счет фрактоэмиссионных явлений, наблюдаемых в их вершинах [6].

Для подтверждения этого возможного механизма образования субмикронных частиц выполнены экспериментальные исследования [7]. Моделирование взрывного разрушения зарядами массой 2.5 г и диаметром 10, 12 мм проведено на образцах песчано-цементного состава, размеры которых составляли 100×100×100 мм. Рассев раздробленной массы осуществлен на ситах размерами 20, 10, 5.5, 4.5, 3, 2, 1 мм. Установлено, что распределение фракций по массе в опытах с совершенно одинаковыми условиями может существенно различаться, что обусловлено, очевидно, неоднородностями состава песчано-цементных блоков в силу специфики их изготовления. При этом прослеживается следующая закономерность: в опытах, где наблюдалось увеличение выхода крупной фракции, снижено количество самой мелкой фракции и обратная картина в опытах, где отмечен выход мелких фракций (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Распределение фракций по массе при разрушении песчано-цементных образцов

Размер фракции, мм	0–1	1–2	2–3	3–4.5	4.5–5.5	5.5–10	10–20
Опыт № 1	700	290	110	10	80	320	380
Опыт № 2	420	240	100	15	75	300	710

Анализ данных других исследований, например работы [8], подтверждает наличие зависимости при взрывном разрушении между выходом самой крупной фракции и самой ее мелкой. Таким образом, чем лучше дезинтеграции и больше фрагментация образцов породы на отдельные их части, тем больше при прочих равных условиях выход мелких фракций и соответственно субмикронных частиц.

С целью изучения возможности генерации частиц со свободной поверхности горных пород при их деформировании и разрушении с образованием новых поверхностей в условиях квазистатического нагружения выполнены исследования и разработаны методики, описание которых и отдельные результаты представлены в [9, 10]. Одна методика проведения измерений субмикронных частиц заключалась в том, что в кубических образцах горных пород со стороной 40–50 мм создавался измерительный объем в виде сквозного отверстия диаметром 6 мм. Внутренний объем отверстия соединялся с атмосферой через воздушный фильтр. Выходной конец второй гибкой трубки присоединялся к лазерному счетчику частиц, например Handheld 3013 или 3016, с помощью которых измерялись количество и дисперсный состав образующихся минеральных частиц. Образцы пород подвергались одноосному сжатию, при этом число частиц и их дисперсный состав регистрировались на каждом шаге нагружения в течение 60 с. На поверхности отверстия благодаря закону перераспределения напряжений могут образовываться области разрушения при одноосной нагрузке на образец от $0.4\sigma^*$, где σ^* — предельное значение напряжения сжатия. Методика проведения экспериментов образцов с отверстием отражена на рис. 1а. Непосредственно в момент разрушения образцов контролировать образование минеральных частиц в рамках данной методики невозможно из-за лавинообразного проникновения частиц из окружающей атмосферы, количество которых в диапазоне размеров 0.3–0.5 мкм составляло за 60 с измерений в воздушной среде $\sim 10^5$.

Отличие второй методики исследований заключалось в использовании специальной камеры (рис. 1б), имеющей резиновую основу со стальными прокладками, которые позволяли воспринимать нагрузку пресса и сохранять герметичность камеры вплоть до разрушения образца.

Камера имела вход, к которому с помощью гибкого шланга подсоединялся воздушный фильтр, не пропускающий из атмосферы частицы размером более 0.1 мкм. Применение фильтра обеспечивало условия, при которых все измерения осуществлялись в среде с низкой фоновой концентрацией частиц. На выходе к камере с помощью второго гибкого шланга подсоединялся ручной лазерный счетчик частиц. Образец размером 40–50 мм помещался в камеру и подвергался одноосному сжатию с одновременной регистрацией количества частиц через каждые 20 с вплоть до разрушения. Отличительная особенность данной методики состоит в том, что она позволяет регистрировать количество частиц непосредственно в момент разрушения и сопоставлять их с площадью вновь образованной поверхности.

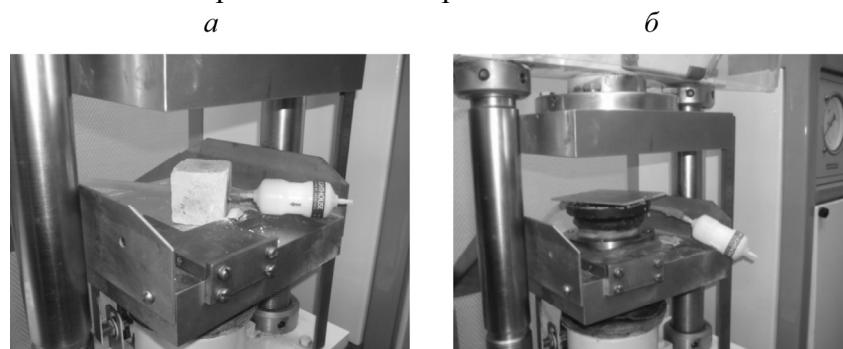


Рис. 1. Исследования эмиссии субмикронных частиц в условиях одноосного сжатия при нагружении образцов с отверстием (а) и при использовании специальной герметичной камеры (б)

По результатам исследований образцов с отверстием представлено распределение субмикронных частиц при нагружении образцов доломита (рис. 2а) и уртыта (рис. 2б) в зависимости от относительного уровня нагружения в различных диапазонах. По оси ординат отложено количество образовавшихся частиц, а по оси абсцисс — значения относительных напряжений, где σ^* — предел прочности исследуемого образца горной породы на одноосное сжатие. Результаты экспериментов указывают на значительное увеличение генерации частиц при достижении определенного уровня напряжений, когда нагрузка на образец составляет примерно 0.6–0.8 от прочности образца горной породы на одноосное сжатие.

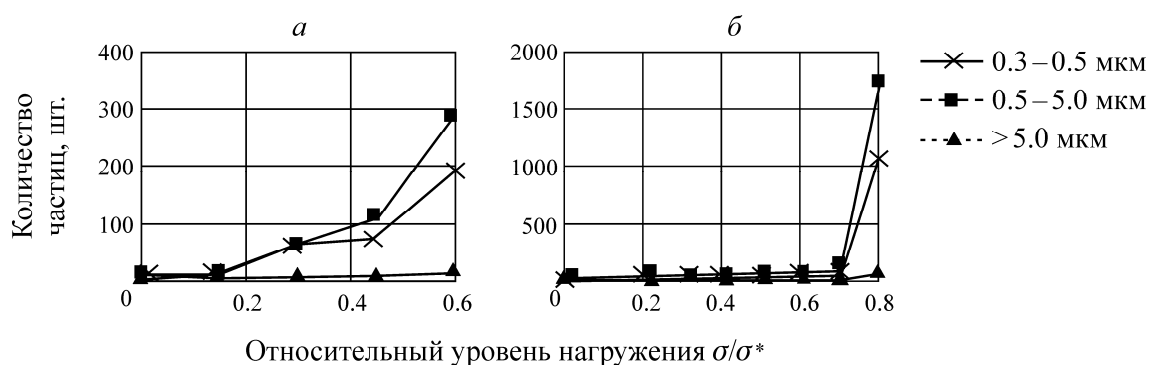


Рис. 2. Эмиссия субмикронных частиц в зависимости от уровня нагружения для доломита (а) и уртыта (б)

Установлено, что дисперсный состав генерируемых частиц и динамика их образования зависят от петрографических особенностей горных пород, механической их неоднородности и степени напряженности. При достижении некоторого критического уровня наблюдается резкое возрастание интенсивности генерации частиц.

На рис. 3 приведены данные для доломита и уррита по количеству частиц в различных диапазонах с течением времени с момента начала нагружения образцов. На оси ординат показано количество частиц, генерируемых за время каждого единичного измерения (20 с) для шести различных диапазонов размеров частиц. Изначально высокое содержание частиц размером 0.3 мкм свидетельствует о том, что отсутствует полная герметичность камеры. Условия герметичности улучшаются по мере нагружения образца доломита и, как следствие, наблюдается уменьшение количества частиц размером 0.3 мкм вплоть до момента локального поверхностного скола, который фиксируется по характерному звуковому проявлению, и приводит к росту количества частиц во всех размерных диапазонах. В момент полного разрушения образца наблюдается резкий рост частиц размером 2–5 мкм, в то время как число частиц размером менее 1 мкм увеличивается не столь значительно. Из эксперимента следует, что при проявлениях макроразрушения (локальные сколы кусочков) резко возрастает число генерируемых частиц, причем наиболее заметен рост числа более крупных частиц размером 1–5 мкм (на порядок и более). При разрушении уррита наблюдается образование значительного количества частиц размером 0.3 мкм, в то время как частицы размером ~10 мкм практически не образуются, их доля незначительна и составляет ~2.5 %.

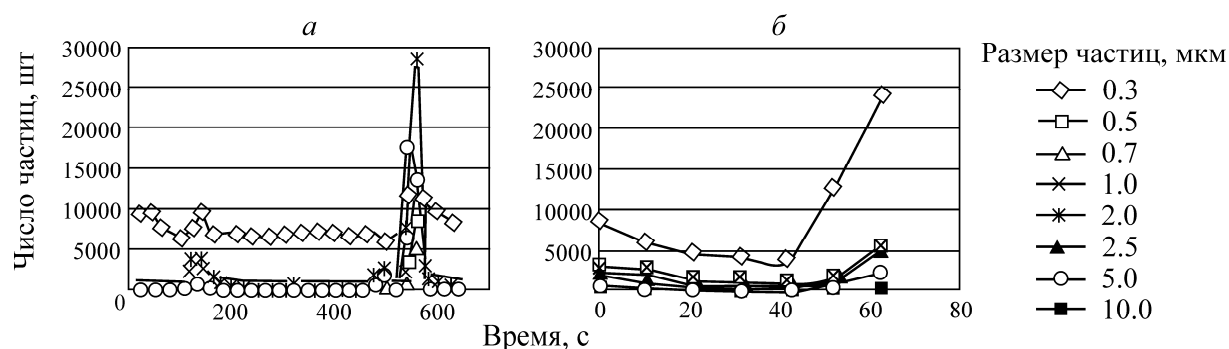


Рис. 3. Образование и распределение частиц по размерам при одноосном сжатии образцов доломита (а) и уррита (б)

Анализ условий образования субмикронных частиц при разрушении горных пород позволил подойти с новых методических позиций к проблеме экологической безопасности при ведении горных работ, в частности взрывных [11, 12]. С применением рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии и лазерной спектроскопии исследованы субмикронные частицы, осажденные после массового взрыва из пылегазового облака.

Экспериментальные исследования выполнены применительно к массовому взрыву на карьере при отбойке железистых кварцитов. Для сбора и определения количества пылевидных минеральных частиц, осажденных из пылегазового облака, использовались аналитические фильтры АФА-ВП20. Путем взвешивания получена массовая доля отдельных фракций частиц, в том числе и субмикронных, образовавшихся при взрыве и осажденных из пылегазового облака. Установлено преобладание фракций размером менее 40 мкм, содержание которых достигает ~40 % (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Распределение по массе различных фракций железистого кварцита

Размер фракции, мкм	+ 160	– 160 + 71	– 71 + 40	– 40
Весовое содержание, г	2.18	14.34	15.78	20.72
Содержание, %	4.1	27.1	29.8	39.0

Для оценки минерального состава фракций выполнен рентгеноструктурный анализ на дифрактометре XRD 7000, который показал, что содержание кварца и рудных минералов (магнетита, гематита) примерно одинаково и составляет 46–49 и 44–47 % (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Результаты рентгеноструктурного анализа фракций железистого кварцита

Размер фракции, мкм	Содержание элементов, %										
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	S	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	F
– 160+71	48.66	43.90	1.5	1.49	1.45	0.49	1.08	0.36	0.14	0.02	0.1
– 40	46.01	47.20	1.12	1.44	1.70	0.16	1.46	0.51	0.20	0.01	0.1

Для количественной оценки дисперсного состава частиц размером 0.3–5.0 мкм использовалась методика с применением лазерного счетчика частиц. Анализ результатов эксперимента (табл. 5) позволяет сделать вывод о преимущественной концентрации микрочастиц в диапазоне более 1 мкм. Их число составляет 57 % от общего количества минеральных частиц, в то время как содержание частиц размером 0.3 мкм не превышает 14 %.

ТАБЛИЦА 5. Дисперсный состав субмикронных частиц по данным лазерной спектроскопии

Размер частиц, мкм	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0
Распределение количества частиц по размерам, %	14.0	29.0	40.0	10.0	7.0

С помощью оптического микроскопа “Olympus” SZ 6.1 и электронного LEO 1450VP получены изображения микрочастиц, осажденных из пылегазового облака при взрыве. Эта визуальная информация дает представление о форме и структуре частиц. Некоторые характерные изображения частиц для фракции размером менее 40 мкм представлены на рис. 4. Метод электронной микроскопии широко используется при решении подобных задач при анализе ультрадисперсных минеральных фракций [13].

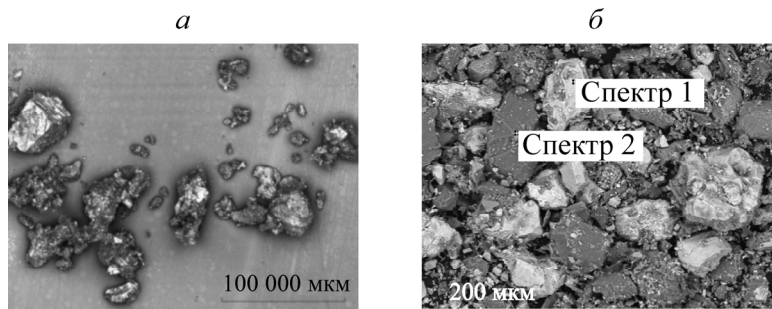


Рис. 4. Изображение частиц железистого кварцита по данным оптической (а) и электронной микроскопии (б)

Следует также отметить, что образование и отрыв частиц от поверхности обнажения происходит при высокой степени напряженности горных пород и в ряде случаев является предвестником возможного катастрофического события, например горного удара [14, 15]. В связи с проблемой горных ударов в настоящее время большой интерес вызывают процессы разрушения, сопровождающиеся развитием упорядоченных структур, которые характерны для массивов горных пород, подверженных сжатию и сдвигу [16, 17]. Механизм упорядоченного разрушения может провоцировать наступление неустойчивых стадий процесса разрушения вблизи выработок в виде горных ударов [18]. В [19] предложена модель, которая позволяет объяснить процессы разрушения в окрестностях концентраторов напряжения при сжатии горных пород,

в рамках которой появление очага разрушения инициирует развитие трещин ограниченных размеров и затем формирование эшелонной структуры таких трещин. Подобие процесса разрушения на микроуровне и при развитии масштабных природных процессов, в частности горных ударов, позволяет использовать лабораторные методики для моделирования некоторых сторон развития катастрофических природных процессов [20].

Испытания образцов со сквозным отверстием при одноосном сжатии предполагает изучение эмиссии частиц со свободной поверхности горных пород в условиях образования упорядоченных структур разрушения. Резкое возрастание интенсивности эмиссии частиц при нагрузках, близких к пределу прочности, служит индикатором приближающегося разрушения образца. Поэтому изучение динамики образования субмикронных частиц может служить основой разработки принципиально нового инструментального метода прогноза техногенных катастрофических явлений, связанных с неконтролируемым разрушением массива горных пород, таких как горные удары [21].

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследовано образование субмикронных частиц при взрывном воздействии и разрушении образцов горных пород в условиях одноосного сжатия. По результатам экспериментов, выполненных в условиях квазистатического и взрывного воздействия на горные породы, установлено, что в большинстве прочных горных пород независимо от вида воздействия преобладают частицы размером несколько микрон, а их минимальный размер составляет ~ 0.1 мкм. Наблюдаемый максимум в распределении субмикронных частиц в диапазоне размеров несколько микрон — отличительная особенность данного распределения. Обычно для более крупных частиц их количество закономерно увеличивается с уменьшением их размеров. Полученное распределение может быть объяснено с позиции значительного увеличения прочности частиц с уменьшением их размера в диапазоне 0.1 мкм. Одним из факторов, влияющим на количество частиц размером ~ 0.1 мкм, является содержание кварца, склонного к хрупкому разрушению.

Рассмотрены механизмы образования субмикронных частиц при разрушении горных пород. Механизм генерации частиц, обусловленный фрагментацией и образованием новых поверхностей, наиболее общий и реализуется независимо от вида воздействия.

Приведены результаты исследования частиц, осажденных из пылегазового облака, после массового взрыва на карьере с применением рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии и лазерной спектроскопии размеров частиц. Показана перспективность данных исследований по оценке минерального и дисперсного состава частиц для мониторинга экологической безопасности при ведении взрывных работ.

Разработанные методики с использованием лазерной спектроскопии, включающие регистрацию субмикронных частиц, содержат информацию о кинетике и характере развития процесса разрушения и могут быть полезны для изучения его механизма. При квазистатическом деформировании образцов в условиях одноосного сжатия имеется этап резкого возрастания интенсивности эмиссии частиц, который предшествует разрушению образца и может служить индикатором для прогнозирования его разрушения.

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. Александров П. А., Калечиц В. И., Хозяшева Е. С., Чечуев П. В. Исследование генерации частиц при разрыве металла // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. — 2003. — № 3. — С. 73–77.
4. 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.
5. 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.
6. Уракаев Ф. Х., Массалимов И. А. Флуктуации энергии и эмиссионные явления в устье трещины // ФТТ. — 2005. — Т. 47. — Вып. 9. — С. 1614–1618.
7. Кочанов А. Н. Изучение особенностей разрушения горных пород и образования мелкодисперсных частиц при взрыве // Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 2005. — Вып. 331. — С. 77–81.
8. Ефремов Э. И., Петренко В. Д., Кратковский И. Л. Проблема разрушения и дезинтеграции полиминеральных горных пород при различных видах нагружения // Сб. докл. X Междунар. конф. по механике горных пород. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1994. — С. 62–70.
9. Викторов С. Д., Кочанов А. Н., Одинцев В. Н., Осокин А. А. Эмиссия субмикронных частиц при деформировании горных пород // Изв. РАН. Серия физ. — 2012. — Т. 76. — № 3 — С. 339–341.
10. Викторов С. Д., Кочанов А. Н., Осокин А. А. Определение состояния предразрушения горных пород по генерации микро- и наноразмерных частиц // ГИАБ. — 2010. — Т. 1. — № 12. — С. 88–93.
11. Викторов С. Д., Закалинский В. М., Кочанов А. Н. Образование и распространение пылегазового облака при сооружении плотины Камбаратинской ГЭС-2 // Взрывное дело. — 2012. — № 108/65. — С. 264–272.
12. Кочанов А. Н. Экспериментальный анализ микрочастиц при разрушении железистых кварцитов в результате массового взрыва // Новые технологии в науке о Земле: материалы V Всеросс. науч.-практ. конф. — Нальчик: КБГУ, 2015. — С. 45–48.
13. Мохов А. В. Комплексное изучение СЭМ и ПЭМ ультрадисперсной фракции лунного реголита // Тез. докл. XXVI Рос. конф. по электронной микроскопии. Т. 2. — Зеленоград, 2016. — С. 622–623.
14. Еременко А. А., Гайдин А. П., Ваганова В. А., Еременко В. А. О критерии удароопасности массива горных пород // ФТПРПИ. — 1999. — № 6. — С. 44–47.
15. Бобряков А. П., Крамаренко В. И., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О стрелянии горных пород // ФТПРПИ. — 1980. — № 5. — С. 3–12.
16. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. — 1974. — № 3. — С. 130–133.
17. Шемякин Е. И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН СССР. — 1991. — Т. 316. — № 6. — С. 1371–1373.
18. Bazant Z. P., Lin F. V., Lippman H. Fracture energy release and site effect in borehole breakout, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 1993, Vol. 17. — P. 1–14.
19. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Структуры разрушения в условиях интенсивного сжатия // Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород // Сб. статей к 75-летию Е. И. Шемякина / под ред. Д. Д. Ивлева и Н. Ф. Морозова. — М.: Физматлит, 2006. — С. 152–165.
20. Ботвина Л. Р. Эволюция поврежденности на различных масштабах // Физика Земли. — 2011. — № 10. — С. 5–8.
21. Викторов С. Д. Образование субмикронных частиц при горном производстве и новый метод оценки катастрофических явлений // Вестн. РАН. — 2013. — Т. 83. — № 4. — С. 300–306.

Поступила в редакцию 11/VI 2016