

УДК 622.7+537.52

**А.В. Подгаецкий, И.Ж. Бунин, С.А. Эпштейн**

**ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ (КРИОГЕННОЙ  
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ)  
ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КАМЕННЫХ УГЛЕЙ**

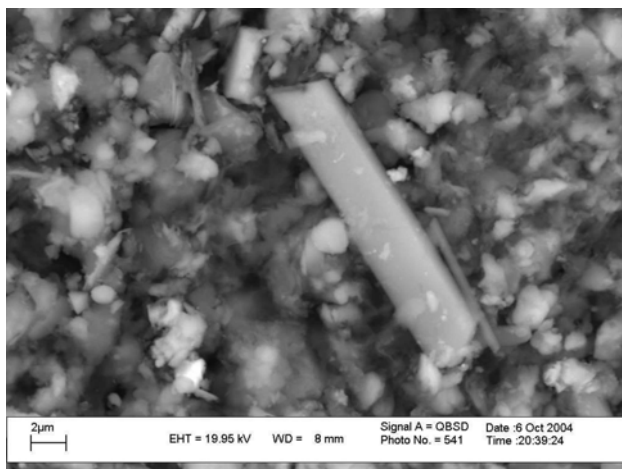
Семинар № 3

**В** ИПКОН РАН в течение последних лет проводятся систематические исследования по селективной дезинтеграции тонкодисперсных минеральных комплексов благородных металлов за счет использования немеханических видов энергетического воздействия [1], в том числе электроимпульсных технологий [2]. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований дано научное обоснование и показаны перспективы и преимущества применения мощных наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ) с амплитудой напряженности электрической компоненты поля  $\sim 10^7$  В/м, позволяющих при обогащении упорных благороднометалльных руд и продуктов обогащения получить стабильный прирост извлечения ценных компонентов при уменьшении энергозатрат. Так, например, предварительная обработка МЭМИ упорных золотосодержащих руд и продуктов их обогащения позволила получить прирост извлечения золота при цианировании на 4-12 %, из концентратов (гравитационных и флотационных) – на 5-45 %, из хвостов обогатительных фабрик – на 30-80 % [1-6].

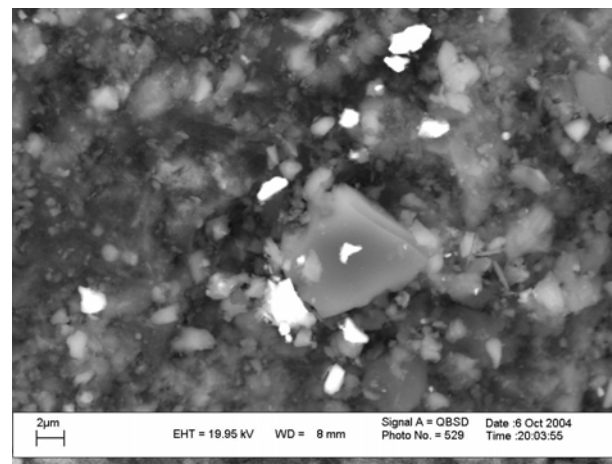
В ходе исследований были рассмотрены возможности использования наносекундных импульсных воздействий для получения широкого

спектра геоматериалов повышенного качества: железосодержащих сульфидов [7], микроклина [1], цеолитсодержащих [8] и шунгитовых пород [1, 9].

Для тонкодисперсных минеральных комплексов, в которых металлическая частица благородных металлов размером менее 10 мкм заключена во вмещающей матрице минерала-диэлектрика (кварц) или минерала-полупроводника (пирит, арсенопирит), основными механизмами процесса селективной дезинтеграции при нетепловом воздействии наносекундных высоковольтных электрических полей являются [10-13]: I – разупрочнение минералов вследствие электрических пробоев матрицы, вмещающей тонкодисперсные металлические частицы; II – дезинтеграция минеральных агрегатов при локальном импульсном нагреве вследствие возникновения термомеханических напряжений на границе сростков компонентов с различными электро- и теплофизическими свойствами; III – поглощение электромагнитной энергии наноразмерными частицами благородных металлов, заключенными в диэлектрическую и полупроводящую среду, вследствие скин-эффекта; IV – поглощение энергии наносекундных МЭМИ в процессе электрических разрядов между частицами минералов-полупроводников вследствие автоэмиссии электронов с их поверхности.

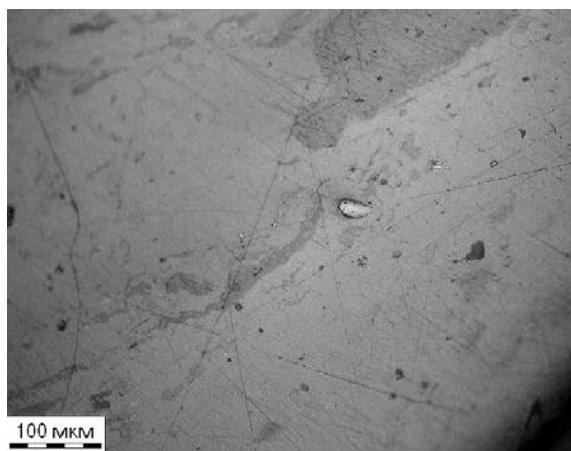


а

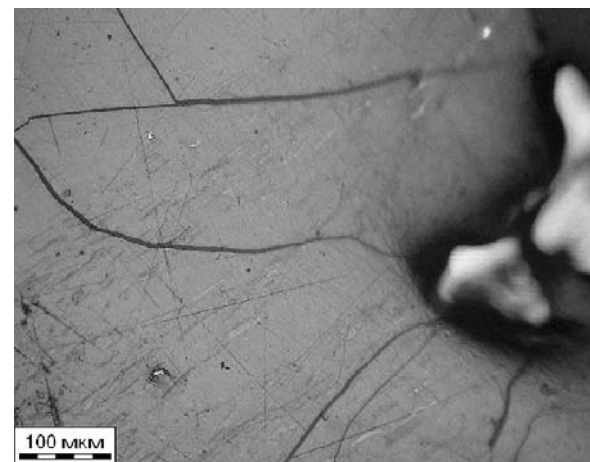


б

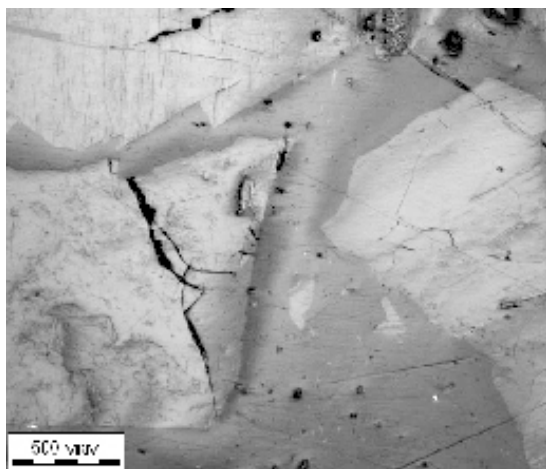
**Рис. 1. Структура поверхности частиц шунгитовых пород до (а) и после (б) воздействия МЭМИ (РЭМ) [1]**



а

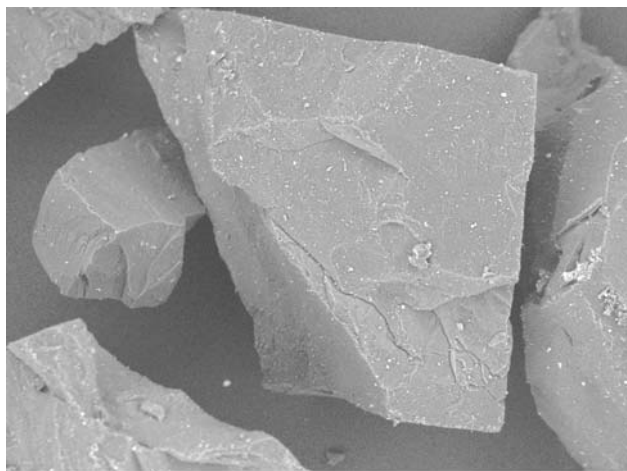


б

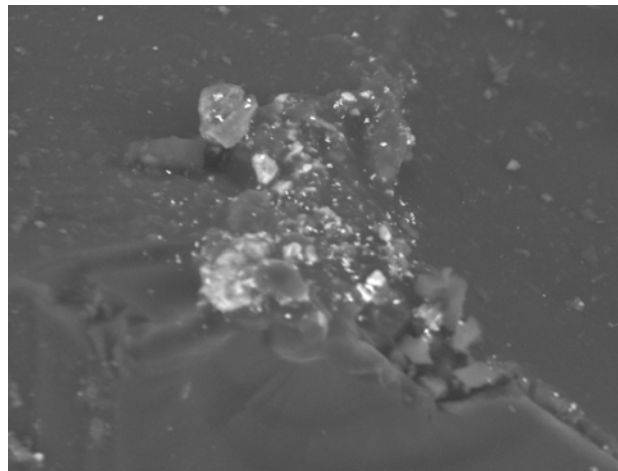


в)

**Рис. 2.** Изменение состояния поверхности угля (а) в результате криогенной (б) и комбинированной (КР – МЭМИ) (в) обработки; поверхность угля в исходном состоянии (а)

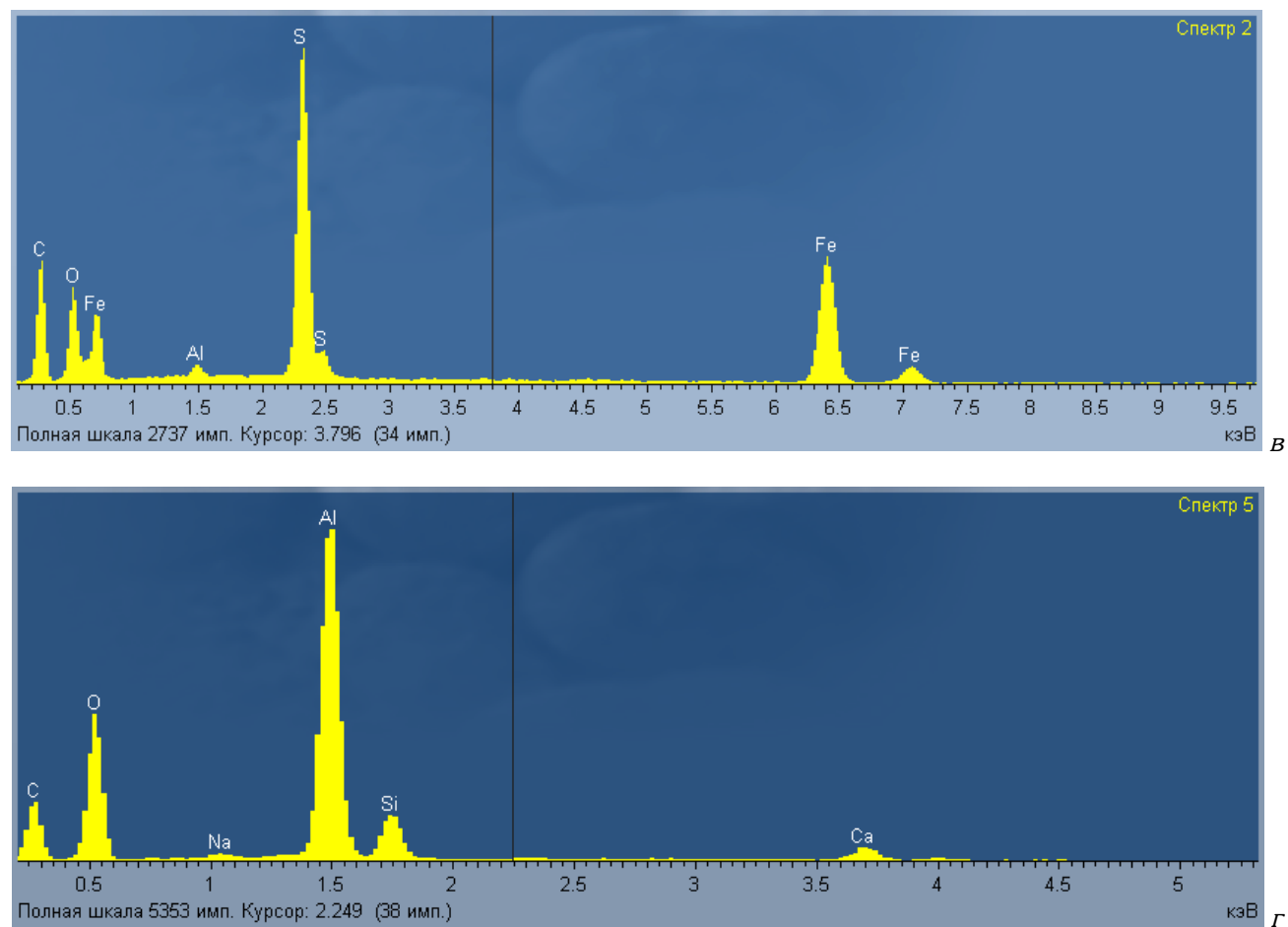


а)

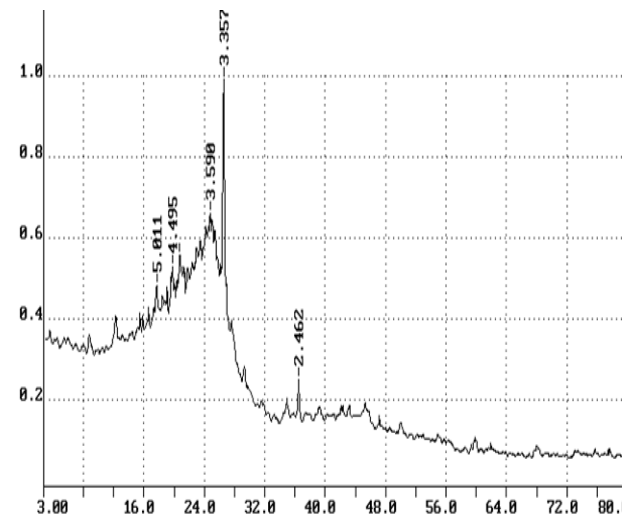
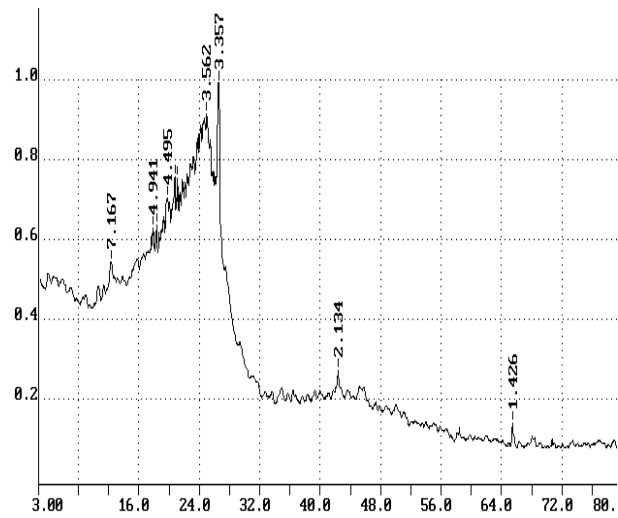


б)

**Рис. 3**



**Рис. 3. Поверхность частицы угля до (а) и после (б) МЭМИ обработки; отраженные электроны (а), (б) и рентгеновские спектры от нее (в), (г) – спектры соответствуют (б)**



**Рис. 4. Рентгенограммы углей до (а) и после КР (б) обработки**

В случае пород с высоким процентом органической составляющей возможно снижение эффективности воздействия МЭМИ из-за экранирующего влияния ископаемой органики, электрофизические свойства которой (для угля – электропроводность и диэлектрическая проницаемость [14]) зависят от состава минеральных включений, влажности, пористости и других факторов. Известно, что для облегчения развития каналов электрического пробоя в органическом веществе ТПИ возможно проведение предварительной обработки материала (например, механоактивации – МА [15]), приводящей к образованию дефектности структуры, дополнительных адсорбционных центров и повышающей реакционную способность вещества. Так, по данным анализа спектров термостимулированной экзоэлектронной эмиссии угля типа ФАС-2 [16] в результате МА-обработки происходило возрастание концентрации изначально существующих дефектов и появление дефектов другого типа.

Ранее [9] нами была проведена обработка серией МЭМИ образцов шунгитовой породы одного из месторождений Карелии в условиях непрерывной подачи материала в зону облучения при амплитуде импульсов 40 кВ и частоте их следования 500 Гц. Материал породы состоял из двух основных компонентов: аморфного шунгитового углерода и кристаллической минеральной части, представленной кварцем. На поверхности частиц породы обнаружены многочисленные разновеликие ( $15 \times 2$  мкм и  $8 \times 0,5$  мкм) углеродистые образования правильной вытянутой формы (рис. 1, а), полевой шпат и глинистые минералы, из рудных минералов – незначительно пирит.

Полученные результаты МЭМИ обработки ШП имели противоречи-

вый характер. С одной стороны, по данным электронной микроскопии, электроимпульсное воздействие вызвало дезинтеграцию минеральных комплексов типа «микровключения пирита в кварце» и сульфидных минералов. На поверхности частиц после импульсной обработки обнаружены характерные области, заполненные мелкодисперсными фрагментами разрушенных сульфидов (рис. 1, б). Скорость окисления углерода по данным дериватографического анализа после обработки повышалась, что могло быть связано либо с увеличением дефектности структуры органического вещества ШП, либо его дисперсности. Также отмечалось увеличение адсорбционной активности по йоду с 11,4 до 12,2 мг/г и истинной (пикнометрической) плотности с 2204 до 2380 г/дм<sup>3</sup>.

С другой стороны, эксперименты по низкотемпературной сорбции азота (метод БЭТ) не выявили существенных изменений удельной поверхности образцов после воздействия МЭМИ, однако по данным АСИЦ ВИМС, после импульсной обработки величина удельной поверхности уменьшилась с 6,13 до 4,8 м<sup>2</sup>/г. Ситовая характеристика материала изменялась незначительно: всего на 0,7 % увеличился суммарный выход классов  $-2,5 + 2,0$  мм и  $-1,6 + 1,0$  мм. Анализ рентгеновских спектров исходных и обработанных МЭМИ проб не выявил существенных изменений в фазовом составе и структуре кристаллической части шунгитовых пород.

Учитывая высокую перспективность разработки ряда месторождений золота содержащих органическое вещество, появилась необходимость более подробного изучения особенностей нетеплового воздействия наносекундных электромагнитных им-

пульсов на структуру и свойства углеродсодержащих минеральных сред, в том числе каменных углей и других твердых горючих ископаемых (ТГИ).

#### **Образцы и методики исследований.**

В данной работе были проведены эксперименты по использованию криогенного воздействия жидким азотом в качестве предварительной активирующей обработки каменного угля. Для опытов был отобран уголь шахты Кировская ПО «Донецкуголь» (пласт  $h_8$  «Прасковиевский», горизонт 810 м). Проба была разделена по крупности на две фракции: крупная + 1,0 мм и мелкая -0,1 +0,04 мм. Замораживание проводилось погружением навески в жидкий азот (-196 °С) при атмосферном давлении на 5-10 мин с последующим оттаиванием до комнатной температуры. Электроимпульсная обработка проводилась на установке УЭИРМ – 1 (ИПКОН РАН); навески угля помещались в межэлектродную область генератора наносекундных электромагнитных импульсов с напряженностью электрической компоненты поля  $E \sim 5$  МВ/м; частота следования импульсов 100 Гц, максимальное время обработки не превышало 2 мин. Применялись различные комбинации криогенной (КР) и электроимпульсной (МЭМИ) обработок.

Влияние обработки на фазовый состав и технологические свойства углей контролировалось методами рентгеновской дифрактометрии (аппарат ДРОН-3,0;  $CuK_{\alpha}$  излучение) и технического анализа углей. Микроструктуру поверхности частиц угля изучали методами оптической и растровой электронной микроскопии с применением рентгеновского микроанализа (микроскоп LEO-1420VP, оснащенный энергодисперсионным микроанализатором INCA-Oxford-350).

Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 20 г по стандартной методике, а микрохрупкость угля определяли по количеству отпечатков с трещинами. (ГОСТ 21206-75. Угли каменные и антрацит. Метод определения микротвердости и микрохрупкости).

#### **Результаты экспериментов и их обсуждение.**

В результате комбинированной обработки отмечено общее увеличение выхода мелких фракций на 17-23%. В табл. 1 приведены результаты, характеризующие влияние различных обработок и их комбинаций на процесс трещинообразования в угле. Параметр  $M$  характеризует число участков, затронутых трещинами. Из таблицы видно, что криогенная обработка существенно увеличивает трещиноватость угля по сравнению с углями исходными и после электроимпульсного воздействия. Однако максимальная трещиноватость частиц угля наблюдалась после комбинированной криогенной и наносекундной импульсной обработки и составила 43%. В этом случае практически все зерна угля были затронуты тонкими трещинами, распространяющимися по всей поверхности зерен (рис. 2, в).

На рис. 2 представлены микрофотографии аншлифов, а на рис. 3 – поверхности частиц исходных и обработанных углей, на которых виден процесс развития трещин в органическом веществе углей в зависимости от типа проведенной обработки. В результате электроимпульсного воздействия наблюдались характерные элементы дезинтеграции минерала в местах неоднородностей (рис. 3, б) и соответствующие им локальные области изменения химического состава поверхности (рис. 3, в, г).

В результате комбинированного воздействия наблюдалось увеличение

Таблица 1

**Влияние обработки на трещиноватость углей**

Вид обработки	М, %	Характеристика микротрещин
Уголь исходный	17	микротрещины на отдельных зернах
МЭМИ	20 – 25	так же
КР	30 – 43	так же
МЭМИ – КР	40	большая часть зерен затронута микротрещинами; тип трещин изменяется- появляются тонкие микротрещины
КР – МЭМИ	43	практически все зерна затронуты трещинами; по всей поверхности зерен преобладают тонкие трещины
КР – МЭМИ – КР	32	как в исходном угле, трещины на отдельных зернах.

Таблица 2

**Микротвердость и микрохрупкость углей после обработки**

Вид обработки	Микротвердость, МПа	Микрохрупкость, %
Уголь исходный	296,7	70 – 80
МЭМИ – КР	357,2	30 – 40
КР – МЭМИ – КР	357,2	
КР – МЭМИ	383,1	

микротвердости (локальной прочности) угля при одновременном уменьшении микрохрупкости (увеличении пластичности), что характерно для комбинированной обработки по схемам КР – МЭМИ и КР – МЭМИ – КР (табл. 2).

Отмечено, что после проведения цикла замораживания – размораживания изменяется вид рентгенодифракционного спектра угольного вещества: происходит смещение и уменьшение интенсивности первого дифракционного максимума, увеличивается интенсивность фона рассеяния (рис. 4).

Криогенная обработка приводит к трансформации структуры органической массы углей вследствие возникновения механических сил, вызванных, по-видимому, ростом кристаллов льда из содержащейся в них физической и связанной влаги. Отмеченные изменения рентгенодифракционных

спектров исходного и обработанного угля объясняются тем, что напряжения, возникшие в результате прохождения ледяного фронта, деформируют углеродные слои, поворачивая их на определенный угол, что приводит к увеличению когерентного рассеяния между слоями в пакете. При этом уменьшается размер слоя ароматического углерода и увеличивается расстояние между слоями [15]. Этим, в определенной степени, можно объяснить увеличение пластичности углей после обработки. Глубина распространения и скорость протекания указанных процессов обуславливает интенсивность и характер трещинообразования.

Воздействие криогенной обработки не ограничивается только органической частью ТГИ. В табл. 3 приводятся экспериментальные данные [17], свидетельствующие о снижении зольности некоторых марок углей Кузнец-



Таблица 3  
**Влияние КР обработки на зольность  
 каменных углей [17]**

Марка угля,	Вид обработки	Зольность, %
Г6	исходный	7,7
	КР в NaOH	3,2
	КР в HCl	2,2
	КР в воде	3,1
	КР на воздухе	3,9
Г17	исходный	3,8
	КР в NaOH	3,0
	КР в HCl	3,5
	КР в воде	2,9
	КР на воздухе	3,8

кого бассейна после их обработки в азоте. Из приведенных результатов видно, что максимальное снижение зольности достигало 50 % для угля Г6. Однако изучение этого явления не являлось задачей данной работы и

требует более подробных исследований.

Таким образом, установлено, что криогенная обработка углей вызывает существенные изменения их физико-химических и механических свойств, приводящих к развитию трещиноватости. Образующиеся микротрещины облегчают прохождение каналов электрического пробоя в органическом веществе ТГИ, что повышает эффективность процесса селективной дезинтеграции минеральных комплексов при наносекундном электромагнитном импульсном воздействии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.  
 2. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ, 2007, № 3, С.107-128.  
 3. Чантурия В.А., Гуляев Ю.В. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Доклады Академии наук, 1999, Том, 366, № 5, С.680-683.  
 4. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. и др. Использование мощных электромагнитных импульсов в процессах дезинтеграции и вскрытия упорного золотосодержащего сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2001, № 4, С.95-106.  
 5. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. Нетрадиционные методы дезинтеграции и вскрытия упорных золотосодержащих продуктов: теория и технологические результаты // Горный журнал, № 4, 2005, С.68-74.  
 6. Chanturiya V.A., Gulyaev Yu.V., Bunin I.J., Lunin V.D., Sedelnikova G.V. Non-traditional Highly Effective Breaking-up

Technology for Resistant Gold-Containing Ores and Benefication Products // Proceedings: XXII International Mineral Processing Congress, Chief Editors: L.Lorenzen and D.J.Bradshaw, Cape Town, South Africa, 29 September – 3 October 2003. Cape Town: Document Transformation Technologies, 2003, Vol.1, PP.232-241.  
 7. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Иванова Т.А. Влияние мощных электромагнитных импульсов на процесс растворения и физико-химические свойства поверхности сульфидных минералов // Материаловедение, 2005, № 11, С. 21-26.  
 8. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Иванова Т.А., Хатькова А.Н. Влияние мощных электромагнитных импульсных воздействий на технологические свойства цеолитсодержащих пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГУ, 2004, № 10, С.311-314.  
 9. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Зубенко А.В., Подгаецкий А.В. Влияние мощных электромагнитных импульсов на структуру и состояние поверхности шунгитовых пород // Труды II Российского совещания по органической минералогии. – Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2005, С.164-166.  
 10. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т. Механизмы дезинтеграции мине-

ральных сред при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Известия АН. Серия. «Физическая», 2004, Т. 68, № 5, С.629-631.

11. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т.* Селективная дезинтеграция тонковкрапленных минеральных комплексов при высокоимпульсном воздействии // Известия АН. Серия «Физическая», 2005, Т. 69, № 7, С.1058-1061.

12. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т.* О пинч-эффекте в сульфидных минералах при импульсном наносекундном воздействии // Известия АН. Серия. «Физическая», 2006, Т. 70, № 7, С. 1061-1064.

13. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т.* Об автоэмиссионных свойствах сульфидных минералов при воздействии мощных наносекундных импульсов // Из-

вестия РАН. Серия. «Физическая», 2007, Т. 71, № 5, С.570-573.

14. *Потапов В.В.* Технология разработки месторождений угля с предварительным его обогащением в подземных условиях // Авт-т дисс. на соиск. уч. ст. канд. технич. наук. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2007, 22 с.

15. *Хренкова Т.М.* Механохимическая активация углей. – М.: Недра, 1993 – 175 с.

16. *Клюев В.А., Кулузова О.А., Ревина Е.С., Топоров Ю.П.* Влияние механоактивации на экзоэмиссионные свойства активированного угля // Письма в ЖТФ, 2001, Т. 27, Вып. 5, С.32-35.

17. Structural transformation in coals at the temperature below 0°C. S.A.Aipshtein, I.V.Zverev and all. Prospects for coal science in the 21<sup>st</sup> century. Taiyuan, P. R. China, 1999. P. 53-56. **ТАЭ**

### Коротко об авторах

*Подгаецкий А.В.* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УРАН ИПКОН РАН;

*Бунин И.Ж.* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник УРАН ИПКОН РАН, старший научный сотрудник;

*Эпштейн С.А.* – кандидат химических наук, доцент кафедры физики; Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. *С.А. Гончаров*.



РУКОПИСИ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. *Дмитриева В.В.* Способы повышения эффективности использования конвейерного транспорта (279/02-09 — 22.12.08) 9 с.