

УДК 553.08; 621.3

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ АБРАЗИВНОГО  
ГРАНАТОВОГО ПРОДУКТА ИЗ ГРАНАТ-СЛЮДЯНЫХ СЛАНЦЕВ  
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ**

**А. С. Потокин<sup>1</sup>, Д. Г. Степенщиков<sup>2</sup>, А. Ф. Усов<sup>1</sup>, Ю. Л. Войтеховский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН,

<sup>2</sup>Геологический институт Кольского научного центра РАН,

E-mail: electric.pulse@mail.ru, stepen@geoksc.apatity.ru, usov@admks.apatity.ru,  
woyt@geoksc.apatity.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

Представлены результаты исследования возможности получения абразивного гранатового продукта из гранат-сланцев месторождения Западных Кейв Кольского полуострова с использованием метода электроимпульсной дезинтеграции материалов. В результате проведенных испытаний в измельченном материале фракции  $-1+0.25$  получено до 90% чистого граната. Проведенные исследования показали хорошие перспективы технической реализации электроимпульсной дезинтеграции для получения чистой гранатовой абразивной крошки.

*Гранат-сланцевые сланцы, Западные Кейвы, электроимпульсная дезинтеграция, гранатовая абразивная крошка*

Известные месторождения граната в Западных Кейвах имеют похожее геологическое строение и равнозначны в плане промышленного освоения [1, 2]. Рассмотрим, например, месторождение г. Макзапах, расположенное на вершине меридионального хребта Восточный Макзапах. Здесь к сланцевой толще близко подходят щелочные граниты. Повышенная концентрация граната приурочена к замковым частям поперечных складок. Вблизи гранитов наблюдается замещение гранатов мусковитом, биотитом, кварц-полевошпатовым материалом и хлоритоидом. Наиболее богатая гранатом зона имеет длину 500–600 м при ширине 10–15 м. Гранат размером более 3 см составляет 7–10 об. % породы. Реже встречаются кристаллы до 30 см. Все месторождения граната в Западных Кейвах локализованы на вершинах сухих пологих возвышенностей и доступны для открытой отработки. Главной проблемой является отсутствие пригодных дорог.

Для оценки целесообразности использования Кейвских гранатов месторождения Макзабах в качестве потенциального абразивного сырья Геологическим институтом и Центром физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН проведены исследования электроимпульсной дезинтеграции этих руд для получения мономинерального продукта, свободного от включений слюды.

**ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Физическая природа электроимпульсного (ЭИ) способа дает возможность достижения более низкой энергоемкости разрушения в сравнении с традиционными способами. Источником нагружения является канал разряда, который находится непосредственно в твердом теле, и разрушение твердого тела происходит за счет растягивающих напряжений. Это обеспечивает достижение минимальных затрат энергии на разрушение, так как прочность материалов на разрыв

почти на порядок ниже, чем на сжатие, свойственное разрушению твердых тел механическим способом. Динамический характер нагружения обеспечивает разрушение материала с минимальными потерями энергии на пластическую деформацию. Энергосодержание канала разряда, обеспечиваемое подводом энергии от емкостного накопителя, может регулироваться в широких пределах по величине и продолжительности, создавая оптимальные условия нагружения твердого тела в зависимости от его природы и размера разрушаемых фрагментов материала. Энергетическая эффективность электроимпульсного разрушения мало критична к механической прочности пород, благодаря чему наибольший технико-экономический эффект применения способа достигается на особо крепких горных породах и мерзлых грунтах. Для реализации ЭИ способа используются импульсные напряжения с амплитудой свыше 250 кВ, крутизной фронта импульса напряжения не ниже 300–500 кВ/мкс (в диэлектрической среде) и 2000–3000 кВ/мкс (в воде), с энергией от сотен джоулей (бурение, резание, измельчение) до нескольких килоджоулей (разрушение железобетонных изделий).

В КНЦ РАН проведены научные разработки и опробование в производственных условиях ряда опытных электроимпульсных установок: для бурения взрывных скважин в подземных выработках; сооружения траншей, котлованов; выделения кристаллов драгоценных камней из вмещающих пород; выделения кристаллов слюды из вмещающих пород; разделки крупногабаритных (до 600–1000 мм) слитков синтетической слюды фтор-флогопит. Работы [4, 6–10] были выполнены впервые и до последнего времени не имели зарубежных аналогов. Метод ЭИ-дезинтеграции в последнее время находит все большее применение при бурении, селективном дроблении пород, резании и поверхностной обработке блочного камня [11–13].

Дезинтеграция как рудоподготовительный процесс перед обогащением должна обладать высокой селективностью разрушения руды, чтобы обеспечить максимальное раскрытие полезных минералов с максимальной сохранностью их от переизмельчения. Механизм повышенной селективности ЭИ-дезинтеграции прежде всего обусловлен избирательной направленностью канала пробоя на рудные включения, создающие в куске руды неоднородности электрического поля. В числе других механизмов: избирательный электрический пробой менее прочных компонентов руды, какими являются минералы пустой породы (например, в слюдяных рудах); избирательное разрушение более хрупкой вмещающей породы (в слюдяных и асбестовых рудах); разупрочнение границ контакта минеральных компонентов руды, отличающихся акустическими свойствами, при прохождении в среде волны разгрузки и разупрочнение границ контакта минералов, отличающихся деформационными свойствами, при прохождении в среде волны сжатия [4].

Эффект повышенной селективности ЭИ-дезинтеграции обеспечивает на последующих стадиях обогащения руд существенное повышение извлечения и улучшение качества концентратов. Как правило, раскрытие зерен минералов происходит на более ранних стадиях измельчения материала, чем при механическом измельчении, и с меньшим ошламованием продукта. Это позволяет применить более экономичный процесс рудоподготовки, снизить энергетические затраты на измельчение.

Технологические испытания различных полиметаллических руд показали возможность электроимпульсной дезинтеграции как процесса, обеспечивающего наилучшую эффективность раскрытия полезных минералов во всех типах руд [5]. Способ ЭИ-дезинтеграции материалов с высокой технологической эффективностью апробирован на рудах с крупнокристаллическими включениями (слюда, асбест, драгоценные камни). Электроимпульсная технология вскрытия кристаллосырья отличается минимальным нарушением целостности освобождаемых кристаллов, выход кондиционного продукта в несколько раз выше, чем при других способах извлече-

ния сырья. Столь значительный технологический результат создает предпосылки для обеспечения экономической эффективности при существующем уровне ресурса работы электротехнического оборудования [14–16]. В определенной мере это справедливо и для гранатов технического назначения, так как благодаря относительно крупным размерам и высокому их содержанию в породе вскрытие ЭИ-способом будет способствовать полному извлечению кристаллосырья при относительно низких энергетических затратах.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом для исследования служили несколько штучков слюдяного сланца из месторождения г. Макзапахк, содержащих полногранные кристаллы граната альмандина ромбододекаэдрического габитуса размером до 50 мм. Электроимпульсная дезинтеграция породы предусматривала две операции:

— выделение кристаллов граната из гранатсодержащей породы для оценки эффективности их вскрытия (отделения от вмещающей породы — слюдиты);

— дезинтеграцию кристаллов для выявления возможности выделения из кристаллов примесей слюдиты мономинерального продукта, пригодного для получения абразивной крошки. После измельчения материал анализировали на содержание мономинерального продукта и его распределения по классам крупности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На стадии вскрытия кристаллов куски породы (8 образцов) подвергались электроимпульсному воздействию в двухэлектродном устройстве (пробойнике) с разрядным промежутком 20–30 мм, при импульсном напряжении до 300 кВ, гарантирующем режим электроимпульсного пробоя с внедрением разряда в породу. Образец руды фиксировался в специальной кювете. Электроды поочередно устанавливались в нескольких местах вблизи кристаллов на слюдите. Процесс дробления длился до полного высвобождения кристаллов граната. Опыты показали, что крупные и мелкие кристаллы граната хорошо выделяются из породы с минимальными примазками слюдиты (рис. 1).

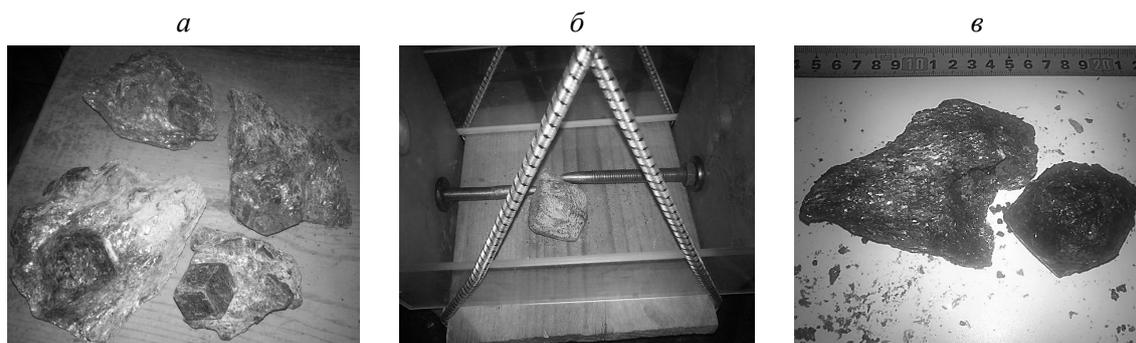


Рис. 1. Исходные куски породы (а), в процессе обработки (б), продукт вскрытия породы (в)

Подготовка пробы для последующего измельчения предусматривала предварительное дробление крупных кристаллов в пробойнике, использовавшемся для вскрытия кристаллов на первой стадии. При свойственном данному процессу дробления кусков породы и кристаллов граната энергосодержании канала (разряд 200–250 Дж) высокая механическая прочность кристаллов приводит к тому, что на начальном этапе разрушения в них формируются откольные воронки с мелким продуктом разрушения (рис. 2б). По мере сокращения размера кристаллов после нескольких импульсов они за счет магистральных трещин раскалывались на отдельные фрагменты.



Рис. 2. Дробление крупного кристалла граната в пробойнике: *а* — кристалл граната до ЭИ-воздействия; *б* — откольная воронка на поверхности кристалла граната после ЭИ-воздействия

На начальной стадии разрушения кристаллов отколом части материала при варьировании величины разрядного промежутка минимальные значения пробивных градиентов на импульсном напряжении уровня 250–300 кВ оценены в 90 кВ/см, а энергоемкость в 3 кВт·ч/т.

Дробление крупных кристаллов граната проводилось до размеров 20–30 мм, а дальнейшее их измельчение осуществлялось в дезинтеграционной порционной камере закрытого типа с электродной системой “острие – полусфера” (рис. 3).



Рис. 3. Продукт измельчения граната в дезинтеграционной камере

Измельчение выполнялось в дождевой воде (повышенное удельное сопротивление уменьшало потери с электропроводностью воды). Групповой состав продукта (высушен и расситован) представлен в таблице.

Анализ фракций проводился визуально как непосредственно (для крупных фракций +10 и –10+3), так и под биноклем. В крупных фракциях анализу подвергались все осколки, а в мелких осуществлялась выборка примерно из 1000 зерен. Подсчитывалось общее число осколков (зерен) и число зерен чистого граната.

Параметр	Класс крупности, мм						Всего
	+10	–10+3	–3+1	–1+0.5	–0.5+0.25	–0.25+0	
Масса продукта, г	83.55	90.74	38.54	7.05	9.03	10.96	239.87*
Содержание, %	34.8	37.8	16.1	2.94	3.76	4.56	100

\* Потери продукта с тонкой взвесью составили 4% от исходной навески в 250 г

Фракция +10 представляет собой 18 осколков. Чистого граната не обнаружено.

Фракция –10+3 имеет 455 осколков, из которых 82 — относительно чистый, прозрачный гранат. Таким образом, доля чистого граната равна 18 %. Осколки чистого граната по размерам ближе к нижнему пределу (3 мм).

Фракция –3+1. Всего под биноклем проанализировано 978 зерен, из которых 434 составляли чистый гранат. Доля чистого граната в данной фракции равна 44 %, остальное — гранат в сростках и посторонние минералы. Зерна слюды попадались в единичных случаях.

Фракция –1+0.5. Проанализировано 970 зерен, из которых 867 составляли чистый гранат. Доля чистого граната 89 %. Примесями, кроме слюды, являлись гранат в сростках и посторонние минералы (рис. 4).



Рис. 4. Продукт электроимпульсной дезинтеграции граната, фракция –1+0.5

Фракция –0.5+0.25. Проанализировано 966 зерен, из которых 825 составляли чистый гранат. Доля чистого граната в данной фракции 85 %. Примесями, кроме слюды, выступали гранат в сростках и посторонние минералы.

Для фракции –0.25+0 количественный подсчет не проводился в силу вариативности размера зерен вплоть до пылеобразного состояния. Качественный анализ выявил практически полное раскрытие граната и большое количество частиц слюды.

Основываясь на результатах анализа, установлено, что доля чистого граната достигает максимума во фракции размера –1+0.5. Меньшее относительное содержание чистого граната в более мелкой фракции –0.5+0.25 объясняется тем, что выбраковке подвергались зерна граната с включениями темных минералов. Свободная слюда вследствие хрупкости легко дробится и поэтому в виде отдельных зерен редко наблюдается во всех фракциях, кроме самой мелкой.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования стали первым опытом получения с помощью электроимпульсной дезинтеграции чистого гранатового материала из гранат-сланцев Западных Кейв. Определено, что в измельченном материале фракции –1+0.25 содержится до 90 % чистого граната. Данный продукт уже в таком виде может быть использован для водоочистки и абразива, а при обогащении продукта с выделением слюды и других примесных минералов в раскрытом виде содержание чистого граната может быть дополнительно повышено. Доизмельчение материала данной фракции, в том числе электрогидроимпульсным способом, позволит получить абразивный песок самых высших марок. Значительным резервом для получения абразивного песка высоких марок является и продукт фракции –0.25+0, в котором гранат практически полностью раскрыт, а частицы слюды могут быть удалены простейшей операцией отмывки в восходящем потоке жидкости.

Имеются хорошие перспективы технической реализации предлагаемой технологии. Для вскрытия кристаллов граната могут быть использованы камеры крупного измельчения, разработанные для выделения драгоценных камней и слюды с производительностью 5–10 т/ч по руде крупностью 200–250 мм. Для измельчения граната может быть адаптирован большой набор измельчительных аппаратов электроимпульсного и электрогидроимпульсного разрушения. При реализации ведущихся сейчас работ по совершенствованию электротехнических средств ЭИ-разрушения на основе импульсного трансформирования можно будет создавать автономные мобильные электротехнологические комплексы (мини-фабрики) для получения гранатового продукта непосредственно на месте разработки месторождения.

В проведении экспериментальных исследований принял участие инженер Д. В. Ильин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Войтеховский Ю. Л.** Гранаты Западных Кейв как потенциальное сырье для абразивных материалов. V Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренц-регион”. — Апатиты: КНЦ РАН, 2013. — С. 41–43.
2. **Войтеховский Ю. Л.** Месторождения альмандин Западных Кейв // XI Съезд Рос. минералог. об-ва “Современная минералогия: от теории к практике” и Федоровская сессия 2010. <http://www.minsoc.ru/2010-1-116-0>.
3. **Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И.** Основы электроимпульсного разрушения материалов. — Апатиты: КНЦ РАН, 1995. — 276 с.
4. **Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А.** Электроимпульсная дезинтеграция материалов. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002. — 324 с.
5. **Каляцкий И. И., Курец В. И., Цукерман В. А., Финкельштейн Г. А.** Основы электроимпульсной дезинтеграции и перспективы ее применения в промышленности // Обогащение руд. — 1980. — № 1. — С. 6–11.
6. **Усов А. Ф.** Опыт разработки техники и технологии электроимпульсного разрушения материалов // Учен. зап. ПетрГУ. — 2011. — № 6 (119). — С. 115–120.
7. **Усов А. Ф., Цукерман В. А., Курец В. И.** Опыт разработки средств электроимпульсной дезинтеграции материалов // ГИАБ. — 2011. — № 12. — С. 310–319.
8. **Усов А. Ф., Цукерман В. А.** Сравнительный анализ эффективности способов дезинтеграции горных пород и руд // ГИАБ. — 2002. — № 7. — С. 132–136.
9. **Усов А. Ф., Цукерман В. А.** Инновационный потенциал энергетически эффективных и экологически щадящих технологий переработки минерального сырья на основе электроимпульсного способа разрушения материалов // ГИАБ. — 2006. — № 4. — С. 132–138.
10. **Usov A., Tsukerman V., Potokin A., Ilin D.** The experience in development of technique and technology of electric pulse disintegration of rocks and ores, REWAS 2016, Towards Materials Resource, 2016. — P. 325–332.
11. **Важов В. Ф., Дацкевич С. Ю., Журков М. Ю., Муратов В. М., Рябчиков С. Я.** Гранулометрический состав шлама при электроимпульсном разрушении горных пород // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 118–125.
12. **Важов В. Ф., Муратов В. М., Левченко Б. С., Пельцман С. С., Жгун Д. В., Адам А. М.** Отбойка горных пород электрическими импульсными разрядами // ФТПРПИ. — 2012. — № 2. — С. 98–103.
13. **Важов В. Ф., Журков М. Ю., Лопатин В. В., Муратов В. М.** Резание горных пород электрическими импульсными разрядами подвижной электродной системой в воде // ФТПРПИ. — 2008. — № 2. — С. 70–77.
14. **Усов А. Ф., Бородулин В. В.** Вопросы разработки электротехнического оборудования для электроимпульсных дезинтеграционных установок // Учен. зап. ПетрГУ. — 2010. — № 6 (111). — С. 90–98.
15. **Усов А. Ф., Потокин А. С.** Концептуальные решения для создания компактных мобильных технологических комплексов на основе электроимпульсного способа разрушения материалов // ГИАБ. — 2013. — № 2. — С. 260–269.
16. **Усов А. Ф., Потокин А. С.** Импульсное трансформирование напряжения и энергии для электроимпульсного разрушения материалов // Тр. КНЦ РАН “Энергетика”. — 2014. — Вып. 9. — С. 40–49.

*Поступила в редакцию 17/III 2017*