

DOI: 10.17076/tm13\_8

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОГО ГРАНАТОВОГО КОНЦЕНТРАТА  
ИЗ МУСКОВИТ-ГРАНАТОВЫХ СЛАНЦЕВ ЗАПАДНЫХ КЕЙВ**

*Потокин А. С.<sup>1</sup>, Степенищikov Д. Г.<sup>2</sup>, Войтеховский Ю. Л.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Горный институт КНЦ РАН;*

*<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты;*

*<sup>3</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург*

В России имеются большие запасы граната. К примеру, в Карелии обнаружены 13 месторождений, из которых можно отметить Тербеостровское с потенциальным ресурсом более 1 млн т руды, проявление Западно-Плотинское с прогнозными ресурсами 50 млн т руды, а также проявление Высота-181, ресурсы которого оцениваются в 12 млн т руды [1]. Крупные месторождения граната также известны на Западных Кейвах – Макзапахк, Ровозеро, Тахлинтуайв и др. Наибольшее количество граната концентрируется в мусковит-гранатовых сланцах и гранатитах, образуя пласты

шириной десятки и длиной сотни метров с содержанием граната около 10%, в отдельных случаях – до 50%. Гранат альмандин выделяется в форме крупных кристаллов размером от 1 до 25 см [2].

Геологическое строение и промышленный потенциал известных месторождений граната в Западных Кейвах сходны. Так, месторождение г. Тахлинтуайв расположено на вершине пологого холма, сложенного гранатслюдяными сланцами. Среди других месторождений региона оно характеризуется наиболее чистыми и хорошо ограненными гранатами размером

3–6 см, до 10 см. Зона, максимально обогащенная гранатом, протягивается на 500 м при ширине 20 м. Содержание граната в породе составляет не менее 10 об. %. В. И. Влодавец оценил запасы месторождения по категории С в 150 тыс. т. Позднее Л. Я. Харитонов переоценил запасы в 80 тыс. т при глубине отработки до 20 м и извлечении граната из породы 10%. Месторождение г. Макзапахк расположено на вершине меридионального хребта Восточный Макзапахк. 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. В. И. Влодавец оценил запасы по категории С в 300 тыс. т, Л. Я. Харитонов переоценил их в 48 тыс. т при глубине отработки до 20 м и извлечении граната из породы 10%. Месторождение в 3 км к западу и юго-западу от оз. Ровозеро расположено на субмеридионально вытянутых холмах, сложенных гранат-слюдяными сланцами. Две зоны обогащения гранатом приурочены к замковым частям поперечных складок. Их ширина 10–20 м при длине 500–600 м. Качество граната невысокое – он окислен и содержит много включений кварца. Размеры кристаллов 2–5 см, до 8 см. Запасы по категории С определены М. Д. Вагаповой в 120 тыс. т. Месторождение г. Берёзовая-II расположено в 4 км к юго-западу от оз. Ровозеро на обрывистом юго-западном склоне широкого холма, имеет ширину 10 м и длину 200 м. Высокие концентрации граната приурочены к замковой части крупной поперечной складки. Вкрест простираения его количество уменьшается, в сланцах появляется микроклин. Наиболее богатая гранатом зона имеет ширину 5–6 м и длину 100 м. Гранат крупный, в среднем 3–5 см, нередко кристаллы до 15 см. Крупные гранаты образуют гнездовые скопления. Среднее содержание граната в породе 25 об. %, но может достигать 50 об. % и более. Запасы по категории С определены М. Д. Вагаповой в 330 тыс. т, Л. Я. Харитонов переоценил их в 10200 т при отработке самого богатого тела размером 5×15×100 м и извлечении граната из породы 10%. Месторождение

г. Берёзовая-I располагается в 1,5 км к югу и аналогично по геологическому строению и запасам.

Кейвский рудный район экономически не освоен, удален от промышленных центров и транспортных коммуникаций. Расстояние до ближайшего крупнонаселенного города Мурманской области (Апатиты) составляет 150–250 км, до села Ловозеро 100–200 км, до морского порта Гремиха 80–100 км. Строительство железнодорожной ветки в сторону кейвских месторождений остановлено в 1953 г. На крайнем западе проходят железная дорога и параллельная ей грунтовая дорога от г. Кировск до г. Ревда, а на юго-западе – грунтовая дорога вдоль Панских тундр до оз. Чурозеро. Имеются два аэродрома местных авиалиний в селах Краснощелье, Каневка и площадка для легкой авиации около горы Шуурурта.

В виду отсутствия в настоящее время выстроенной логистики абразивные гранаты Западных Кейв не столь ликвидны как руды платиновых металлов, запасы которых подсчитаны в расположенных южнее Федорово-Панских тундрах. Однако, если освоение последних окажется рентабельным, что потребует строительства дороги от пос. Октябрьский через Марьокские болота, то одновременно в значительной мере будет решена проблема вывоза гранатового концентрата и понижена его себестоимость [3].

При анализе местности Западных Кейв с использованием поисково-информационной картографической службы Яндекса «Яндекс-карты» был выявлен неразрывный водный путь, по которому теоретически возможна транспортировка гранатовой руды для ее дальнейшего обогащения от месторождения г. Ровгора (Зап. Кейвы, Кольский п-ов, Россия) до ЗАТО г. Островной по водному маршруту: оз. Ровозеро – р. Рова – оз. Кальмозеро – р. Иоканга – губа Иоканга (общая протяженность 224 км). Также был выявлен второй, более короткий маршрут (94 км) от г. Ровгора до с. Ловозера однако, между реками Рова и Ленъявр водный путь разрывается участком суши, протяженностью около 830 м.

При заинтересованности малого и среднего бизнеса на условиях предпринимательского риска, наличия на рынке технико-технологической основы для создания технологических комплексов выделения гранатов из руд Западных Кейв и их измельчения для получения гранатового концентрата в г. Островной может быть создано малое промышленное предприятие по добыче

абразивных гранатов Западных Кейв. Далее полученный гранатовый концентрат может быть отправлен из порта Гремиха водным сообщением в любой морской порт РФ.

### **Применение гранатового продукта в промышленности**

Поскольку гранат относится к перспективным индустриальным минералам, области его использования постоянно расширяются. Потребление гранатового продукта по отраслям распределяется примерно следующим образом: 40% – очистка поверхностей, 24% – очистка воды, 12% – гидроабразивная резка, 12% – изготовление абразивов, 6% – изготовление мягких абразивов, 4% – нефтяная промышленность, 2% – прочие отрасли. Конкретная область применения гранатового песка зависит от фракции. Самые высокие требования по фракционности к абразивам предъявляются для применения обработки поверхностей, гидроабразивной резки и очистки питьевой воды. Для этих целей содержание чистого граната в продукте должно быть не ниже 95%. Для очистки технической воды содержание чистого граната в смесовых гранат-кварцевых песках может составлять от 55 до 65%.

### **Электроимпульсный метод дезинтеграции для получения чистого гранатового концентрата**

Методы обогащения граната зависят от свойств минералов, слагающих руду и уровня развития техники. За рубежом на небольших предприятиях, добывающих гранат из верхних выветрелых горизонтов и россыпей, обогащение ведется путем промывки и просеивания. В России для обогащения руд предложена гравитационно-магнитная схема, характеризующаяся более высокой эффективностью процесса извлечения граната [1]. Для оценки перспективности переработки гранатосодержащей руды крайне необходимы ее технологические испытания как потенциального абразивного сырья в соответствии с современными требованиями промышленности.

В 2017 г. Геологическим институтом (ГИ КНЦ РАН) и Центром физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН (ЦЭС КНЦ РАН) впервые были проведены исследования с целью выявления возможности получения чистого гранатового концентрата из гранат-сланцевых сланцев Западных Кейв (месторождение Макзапахк) с применением метода электроимпульсной дезинтеграции (ЭИД),

отличающегося повышенной селективностью разрушения по сравнению с механическими способами. В основе метода лежит разрушение материала под действием силовых полей, генерируемых каналом электрического пробоя твердого тела при импульсном выделении в нем энергии накопителя [4, 5].

В методе ЭИД 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 до нескольких килоджоулей. Метод отличается высокой энергетической эффективностью и уникальными технологическими особенностями, позволяющими универсально использовать его для бурения скважин различного диаметра и назначения, дробления и измельчения руд и технических материалов, резки, поверхностной обработки массива и блочного камня и др. [6]. Метод ЭИД с высокой технологической эффективностью апробирован на рудах с крупнокристаллическими включениями (сланца, асбест, драгоценные камни). Электроимпульсная технология вскрытия кристаллосырья отличается минимальным нарушением целостности освобождаемых кристаллов, выход кондиционного продукта в несколько раз выше, чем при других способах извлечения. Столь высокий технологический эффект на продуктах очень высокой стоимости создает предпосылки для обеспечения экономической эффективности технологии при существующем уровне ресурса работы электротехнического оборудования. В определенной мере это справедливо и для гранатов технического назначения (Западнокейвские, Карельские гранаты), так как благодаря относительно крупным размерам и высокому их содержанию в породе вскрытие электроимпульсным способом будет способствовать извлечению кристаллосырья с высокой производительностью при относительно низких энергетических затратах.

Испытания по получению мономинерального гранатового продукта с использованием ЭИД проводились в три этапа (рис. 1):

1. Выделение кристаллов граната из штуфов слюдяного сланца (1, 2);
2. Электроимпульсная дезинтеграция выделенных кристаллов граната (3, 4);
3. Разделение продукта по фракциям и отмывка гранатового продукта от слюдяных включений (5, 6).

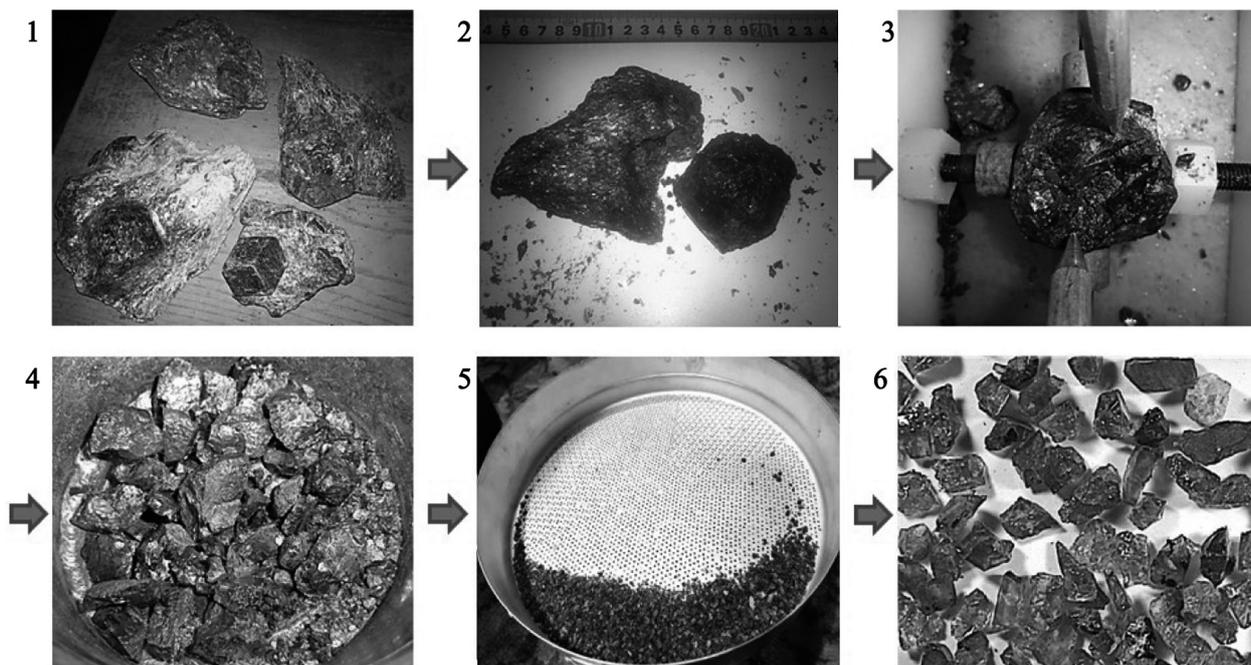


Рис. 1. Этапы получения мономинерального гранатового продукта с использованием ЭИД

Исходным материалом для исследования являлись несколько штучков слюдяного сланца месторождения г. Макзапахк, Зап. Кейвы, содержащие кристаллы граната альмандина ромбододекаэдрического габитуса размером до 5 см. Первый этап выделения кристаллов гранатов с применением ЭИД проводился 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. Процесс дробления длился до полного высвобождения кристаллов граната. Опыты показали, что крупные и мелкие кристаллы граната хорошо выделяются из породы с минимальными примазками слюдита.

Второй этап заключался в дроблении непосредственно самих кристаллов граната с применением ЭИД до получения наиболее мелкой фракции гранатового продукта. Для разрушения крупных кристаллов граната процесс производился последовательно с применением двух различных камер – пробойника с подводящей электродной системой «острие-острие» и порционной камеры закрытого типа с электродной системой «острие-полусфера». В ходе проводимых исследований была разработана и запатентована многостадийная камера для электроимпульсного вскрытия и последующей дезинтеграции кристаллов граната из гранатослюдяных сланцев [7].

После электроимпульсного дробления кристаллов граната, проводилось разделение продукта по фракциям (мм): +10; –10+3; –3+1; –1+0.5; –0.5+0.25; –0.25+0 с использованием сит-классификаторов. После разделения продукта по классам крупности, проводился визуальный анализ каждой фракции под бинокляром. Подсчитывалось общее число осколков (зерен), и число зерен чистого граната. Самой чистой оказалась фракция –1+0.5 мм. В ней было проанализировано 970 зерен, из которых 867 составлял чистый гранат. Таким образом, доля чистого граната составила 89%. Примесями, кроме слюды, являлись гранат в сростках и посторонние минералы (рис. 2).

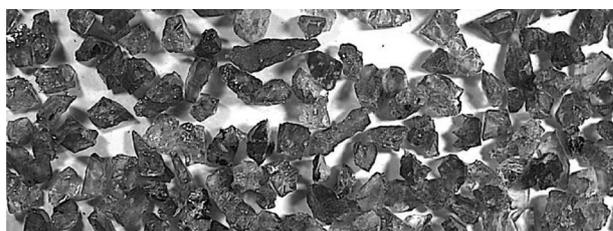


Рис. 2. Продукт электроимпульсной дезинтеграции граната, фракция –1+0.5 мм

Для выявления возможности получения более чистого гранатового продукта была произведена отмывка всех полученных фракций гранатового продукта восходящим потоком воды. После отмывки также был проведен анализ отмытых фракций под бинокляром. Во всех фракци-

ях, кроме  $-0.25+0$  мм бралось около 500 зерен. Подсчитывалось общее число зерен и число зерен чистого граната, под которым подразумевались прозрачные осколки граната с незначительными включениями посторонних минералов. Разницу между общим числом зерен и зерен чистого граната представляли мутный гранат, гранат с включениями, слюда и посторонние минералы. Результаты подсчета представлены в Таблице. Относительная доля чистого граната указана в скобках в процентах с округлением до единиц. Доля чистого граната фракции  $-0.5+0.25$  мм после отмывки от слюдяных включений составила 94%. Данный продукт уже в таком виде может быть использован для водоочистки и абразива, а при обогащении продукта с доизмельчением материала электрогидроимпульсным способом [8] и выделением слюды и других примесных минералов в раскрытом виде, содержание чистого граната может быть дополнительно повышено, что позволит получать гранатовый концентрат самых высших марок.

Из таблицы видно, что для всех фракций доля чистого граната в случае «гранат» выше, чем в соответствующей фракции «отмывка». С уменьшением размера зерен в обоих случаях содержание чистого граната растет, причем в случае «гранат» с уменьшением размера зерен рост идет по убывающей, а в случае «отмывка» – по возрастающей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Каменева Е. Е., Савицкий А. И. Гранатовые руды северной Карелии, технологические подходы к их освоению и возможные области использования // Геология и полезные ископаемые Карелии. № 5. 2002. С. 82–91.
2. Войтеховский Ю. Л. Гранаты Западных Кейв как потенциальное сырье для абразивных материалов // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренц-региона в технологии строительных и технических материалов: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2013. С 42–43.
3. Войтеховский Ю. Л. Кольский альмандин – отличный абразивный материал // СЕВЕР промышленный, 2006. № 4. С. 35–36.
4. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Завадовская Е. К. и др. Импульсный пробой и разрушение ди-

Таблица

### Доля чистого граната в различных фракциях гранатового продукта

Фракция, мм	гранат		отмывка	
	чистый гранат	всего	чистый гранат	всего
$-0.25+0$	–	–	–	–
$-0.5+0,25$	490 (94%)	522	500 (85%)	586
$-1+0.5$	502 (92%)	548	428 (78%)	547
$-3+1$	458 (85%)	536	333 (73%)	457

## Заключение

Выполненное исследование является первым опытом для оценки возможности получения чистого гранатового материала из гранат-слюдяных сланцев Западных Кейв с применением метода электроимпульсной дезинтеграции. Имеются хорошие перспективы технической реализации предлагаемой технологии. У КНЦ РАН достаточно богатый практический опыт создания демонстрационных (опытно-промышленных) установок как для вскрытия и выделения крупнокристаллических минералов, так и измельчения. Для вскрытия кристаллов граната могут быть использованы камеры крупного измельчения, разработанные для выделения драгоценных камней и слюды с производительностью до 5–10 т/ч по руде крупностью 200–250 мм.

электриков и горных пород // Томск: Изд-во Томского ун-та, 1971. 225 с.

5. Usov A. F., Potokin A. S. Electric pulse disaggregation of materials – Russian experience // XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC) 2012. New Delhi, India. Conference Proceedings. P. 05618–05626.

6. Усов А. Ф., Потокин А. С. Концептуальные решения для создания компактных мобильных технологических комплексов на основе электроимпульсного способа разрушения материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) ГИАБ, 2013. № 2. С. 260–269.

7. Потокин А. С., Усов А. Ф. Устройство для электроимпульсной дезинтеграции материалов // Патент на полезную модель RUS № 178039 от 05.06.2017.

8. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности, «Машиностроение». СПб, 1986. 252 с.