

ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ РАСКРЫТИЯ ПОЛЕЗНЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ТРУДНООБОГАТИМОГО ПОЛИМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ЕГО РАЗУПРОЧНЕНИЕМ

Виктор Иванович Ростовцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доб. 167, e-mail: benevikt@misd.ru

Сергей Александрович Кондратьев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, зав. лабораторией обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доб. 120, e-mail: kondr@misd.ru

Ранее выполненные исследования в ряде институтов нашей страны, в том числе в ИГД СО РАН и в ИЯФ СО РАН, показали возможность улучшения технологических показателей флотационного обогащения труднообогатимого минерального сырья за счет предварительной электронно-лучевой обработки, которая позволяет разупрочнять минералы и горные породы. Важным для технологического применения является получение данных по селективной дезинтеграции и раскрытию минералов при рудоподготовке. Цель исследований – получение экспериментальных данных, подтверждающих повышение селективности дезинтеграции обработанного пучком высокоэнергетических электронов минерального сырья и улучшение раскрытия сростков полезных минералов. Выполненные комплексные экспериментальные минералого-технологические исследования на примере труднообогатимой свинцово-цинковой руды крупностью -3 мм позволили получить данные о повышении селективности дезинтеграции минерального сырья и улучшении раскрытия полезных минералов. Установлено, что если в классе -0,071 мм измельченной свинцово-цинковой руды без обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита (модификации сфалерита) составляет 40,7 и 65,7%, то при использовании предварительной обработки руды доля свободных зерен указанных минералов повышается до 66,4 и 71,5%. Следует отметить, что обработка руды ускоренными электронами позволяет получить измельченный материал, в котором свободные зерна минералов в меньшей степени переизмельчаются. Для галенита крупность свободных зерен повышается с 2,6 до 4,0 мкм, а для вюрцита – с 4,5 до 6,6 мкм. Научная новизна заключается в повышении селективности дезинтеграции и улучшении раскрытия полезных минералов за счет использования эффекта разупрочнения минерального сырья при его рудоподготовке.

Ключевые слова: разупрочнение, электронно-лучевая обработка, селективность дезинтеграции, раскрытие полезных минералов, свинцово-цинковая руда.

INCREASING THE SELECTIVITY OF USEFUL MINERAL DISCLOSURE WHEN PROCESSING DIFFICULT POLYMINERAL RAW MATERIALS WITH PRELIMINARY WEAKENING

Viktor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Mineral Dressing and Engineering Ecology, phone: (383)205-30-30, extension 167, e-mail: benevikt@misd.ru

Sergey A. Kondratyev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of the Laboratory of Mineral Dressing and Engineering Ecology, phone: (383)205-30-30, extension 120, e-mail: kondr@misd.ru

Previous studies at a number of research centers in our country, including the Institute of Mining, SB RAS and the Institute of Nuclear Physics, SB RAS, showed the possibility of improving process parameters of flotation concentration of difficult mineral raw materials due to preliminary electron-beam processing, which allows weakening minerals and rocks. Obtaining the data on selective disintegration and disclosure of minerals during ore pretreatment is important for technological application. This study aims at receiving the experimental data confirming an increase in the selectivity of disintegration of mineral raw materials processed by a high-energy electron beam and an improvement in the disclosure of intergrowths of useful minerals. Complex experimental mineralogical and technological studies by the example of rebellious lead-zinc ore with a grain size of -3 mm provided the data on increasing the selectivity of disintegration of mineral raw materials and improving the disclosure of useful minerals. It is found that if in -0.071 mm size class of ground lead-zinc ore without processing, the fraction of free galena and wurtzite grains (sphalerite modification) is 40.7 and 65.7%, then the fraction of free grains of these minerals increases up to 66, 4 and 71.5% in ore pretreatment. It should be noted that ore processing by accelerated electrons allows obtaining the ground material, in which free mineral grains are less overground. For galena, the size of free grains increases from 2.6 to 4.0 μm , and for wurtzite – from 4.5 to 6.6 μm . Scientific novelty includes increasing the selectivity of disintegration and improving the disclosure of useful minerals through the effect of weakening of mineral raw materials in ore pretreatment.

Key words: weakening, electron-beam processing, selectivity of disintegration, disclosure of useful minerals, lead-zinc ore.

Введение

Развитие минерально-сырьевой базы нашей страны предполагает вовлечение в разработку месторождений труднообогатимых руд и освоение техногенных минеральных образований. В этой связи первостепенной для отрасли и государства в целом становится задача ресурсосбережения и использования техногенных ресурсов. Важнейшим аспектом ее решения является необходимость разработки и внедрения новых технологий первичной переработки минерального сырья и технологий для использования отходов с целью доизвлечения из них ценных компонентов.

В настоящее время в России осуществляется переход к наилучшим доступным технологиям (НДТ), который официально стартовал в июле 2014 года с принятием Федерального закона от 21.07.2014 года № 219-ФЗ, по которому предприятия должны внедрять экономически рентабельные технологии, минимизирующие образование отходов и выбросов [1–3].

Как указывается в [2], по количеству и качеству балансовых запасов минерального сырья в России (с учетом наличия или отсутствия геологических перспектив наращивания минерально-сырьевой базы) все значимые для экономики страны полезные ископаемые можно разделить на три группы. В первую группу входят полезные ископаемые, запасы которых при любых сценариях развития экономики удовлетворят необходимые потребности до 2035 года и в после-

дующий период. К этой группе относятся природный газ, медь, никель, олово, вольфрам, молибден, тантал, ниобий, кобальт, скандий, германий, платиноиды, апатитовые руды, железные руды, калийные соли, уголь, цементное сырье. Ко второй группе относятся полезные ископаемые, достигнутые уровни добычи которых недостаточно обеспечены запасами разрабатываемых месторождений на период до 2035 года. К этой группе относятся нефть, свинец, сурьма, золото, серебро, алмазы, цинк, особо чистое кварцевое сырье. К третьей группе относятся дефицитные полезные ископаемые, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом и (или) складированными запасами. К этой группе относятся полезные ископаемые, минерально-сырьевая база которых в России характеризуется преимущественно низким качеством (уран, марганец, хром, титан, бокситы, цирконий, бериллий, литий, рений, редкие земли иттриевой группы, плавиковый шпат, бентониты для литейного производства, полевошпатовое сырье, каолин, крупнолистовой мусковит, йод, бром, оптическое сырье).

Следует отметить некоторые месторождения дефицитных полезных ископаемых (хрома, редкоземельных металлов) сопоставимы по качеству с разрабатываемыми месторождениями за рубежом, что делает особенно актуальным разработку и применение специальных механизмов стимулирования их освоения. Для начала освоения неразрабатываемых месторождений марганца, урана, хрома либо возобновления добычи полезных ископаемых на ранее эксплуатируемых месторождениях йода, брома, плавикового шпата, лития, бериллия, оптического сырья необходимо внедрение эффективных технологий обогащения и переработки минерального сырья.

Среди приоритетов научно-технологического развития в сфере геологического изучения недр, поисков, оценки и разведки месторождений полезных ископаемых в [2] указаны:

- разработка технологий, направленных на увеличение коэффициентов извлечения минерального сырья и сокращение его потерь при добыче и переработке;

- разработка и совершенствование технологий рентабельной добычи и переработки низкокачественных руд остродефицитного и высоколиквидного минерального сырья.

В [4] отмечается необходимость создания высокоэффективных энергосберегающих технологий рудоподготовки и селективной дезинтеграции труднообогатимого и техногенного минерального сырья; научного обоснования изменений структурных, физико-химических, технологических свойств минералов в процессе комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и минеральные суспензии для повышения извлечения микро- и наночастиц ценных компонентов из нетрадиционного минерального сырья.

В ряде работ приведены результаты экспериментальных исследований и показана на примере различных горных пород возможность их разупрочнения при воздействии ускоренными электронами, что может быть использовано для

снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении. Выполненные эксперименты на примере гранита показали [5], что после его обработки пучком высокоэнергетических электронов при увеличении поглощенной дозы скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются и снова уменьшаются. Полученные закономерности изменения свойств гранита связаны с его дефектностью, обусловленной памятью исследованной горной породы. Наиболее существенные изменения в величинах скоростей продольных и поперечных волн в обработанных зернах гранита с течением времени до 5360 часов после обработки наблюдаются при значении поглощенной дозы 10 кГр. В [5–7] доказано, что после обработки зерен гранита потоком ускоренных электронов при дозе 10 кГр прочность при одноосном сжатии уменьшается с 68,33 до 35,08 МПа, а модуль деформации – с 13,19 до 7,04 ГПа. Такая обработка гранита позволяет снизить его энергию разрушения одноосным сжатием с 7.68 до 3.06 Дж, а энергию дробления с 700.42 до 470.88 Дж.

Важным для технологического применения является получение данных по селективной дезинтеграции и раскрытию минералов при рудоподготовке. Цель исследований – получение экспериментальных данных, подтверждающих повышение селективности дезинтеграции обработанного пучком высокоэнергетических электронов труднообогатимого свинцово-цинкового минерального сырья и улучшение раскрытия сростков полезных минералов. Научная новизна заключается в повышении селективности дезинтеграции и улучшении раскрытия полезных минералов за счет использования эффекта разупрочнения минерального сырья при его рудоподготовке.

Необходимость интенсификации процессов рудоподготовки и обогащения свинцово-цинковых руд актуальна для ряда месторождений Российской Федерации в регионах Сибири, Алтая, Забайкалья, Урала [8]. Большинство руд указанных и других месторождений относятся к сложным, упорным и труднообогатимым. Указанные месторождения по данным [9] являются колчеданными вулканогенного происхождения. К этому типу относятся Тишинское, Степное, Рубцовское, Таловское, Озерное (Забайкалье) месторождения России, а также ряд месторождений Казахстана (Жайремское, Лениногорское и др.).

Методы и материалы

В настоящей работе исследовалось влияние предварительного разупрочнения полиминерального сырья энергетическим воздействием на результаты рудоподготовки свинцово-цинковой руды Рубцовского месторождения. Полезные минералы в этой руде представлены галенитом, вюрцитом (модификация сфалерита), пиритом, магнетитом. Среднее процентное содержание металлов в ней составляет: Fe – 6,20; Pb – 2,30 и Zn – 4,90. В состав породной части входит в основном кварц, кальцит, обнаружены также ортоклаз. Доля смешанного сульфида составляла 90-95%. В руде представлены следующие типы текстур

гидротермальных отложений: массивная, пятнистая, вкрапленная, коломорфная и другие. Для исследованной пробы характерно неравномерное распределение минералов в руде.

Перед измельчением руда была раздроблена с помощью щековой дробилки до крупности -3 мм и разделена на образцы для исследований селективности дезинтеграции и раскрытия минералов. Гранулометрический состав дробленной руды приведен в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав руды Рубцовского месторождения
после дробления до крупности -3 мм

Класс, мм	Выход %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
+1	32.50	2.15	4.62	6.28	30.41	30.62	32.93
-1+0.5	22.70	2.11	4.75	5.87	20.89	22.00	21.50
-0.5+0.25	14.80	2.27	4.89	6.48	14.62	14.76	15.47
-0.25+0.125	9.40	2.35	5.18	6.65	9.61	9.93	10.09
-0.125+0.071	5.90	2.72	5.72	6.55	6.98	6.86	6.23
-0.071	14.70	2.74	5.28	5.81	17.53	15.83	13.78
ИТОГО	100.00	2.30	4.90	6.20	100.00	100.00	100.00

Так как для последующего обогащения свинцово-цинковой руды необходима его крупность 80 % класса -0.071 мм, то получены экспериментальные результаты исследований по кинетике измельчения пробы руды крупностью -3 мм в рольганговой мельнице при Т:Ж:Ш = 1:1:9 (табл. 2). Гранулометрический состав руды крупностью -3 мм и измельченных продуктов определялся в аппарате влажного ситового анализа, изготовленном фирмой ФРИЧ (ФРГ).

Для выявления особенностей раскрытия минеральных сростков были проведены исследования с помощью электронного микроскопа Hitachi 3400N и соответствующей программы обработки изображения SIMAGIS. Объектом исследований являлся материал класса $-0,071$ мм в дробленной руде, в измельченной в течение 26 минут руде без обработки, а также в измельченной при том же времени руде с предварительной ее обработкой ускоренными электронами.

Таблица 2

Кинетика измельчения дробленной до крупности -3 мм руды
Рубцовского месторождения

Класс, мм	Время измельчения, минут			
	0	21	31	40
+1	32.50	4.95	1.65	0.85
-1 + 0.071	52.80	23.76	10.00	3.97
-0.071	14.70	71.29	88.35	95.08
Итого	100.00	100.00	100.00	100.00

Анализ данных табл. 2 показывает, что необходимая для флотационного обогащения крупность измельченной руды – 80% класса -0.071 мм – может быть получена при измельчении в течение 26 минут. Это время измельчения принято в дальнейших исследованиях по разупрочнению обработкой потоком ускоренных электронов свинцово-цинковой руды Рубцовского месторождения.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты исследований по повышению селективности раскрытия полезных минералов при рудоподготовке и обогащении труднообогатимого полиминерального сырья Рубцовского месторождения с предварительным его разупрочнением приведены в настоящей статье.

Технологическая схема обогащения приведена на рис. 1. Расход реагентов во всех опытах по флотации был одинаковый и составлял в основной флотации: собиратель – ксантогенат бутиловый (Кх) – 100 грамм на тонну руды (100 г/т), вспениватель – Т-86 – 50 г/т; в контрольной флотации: ксантогенат бутиловый Кх – 50 г/т, вспениватель – 50 г/т. Обработка руды с целью разупрочнения осуществлялась электронным пучком на промышленном ускорителе ИЛУ-6 Института ядерной физики СО РАН. Параметры пучка электронов и доза облучения изменялись в соответствии с требованиями эксперимента.

На рис. 2 показан фрагмент технологического зала промышленного ускорителя ИЛУ-6 Института ядерной физики СО РАН. Видна нижняя часть ускорителя, под которым размещен транспортер. На транспортере находится емкость из нержавеющей стали, в которую помещена для обработки потоком ускоренных электронов исходная свинцово-цинковая руда крупностью – 3 мм и массой 200 г.

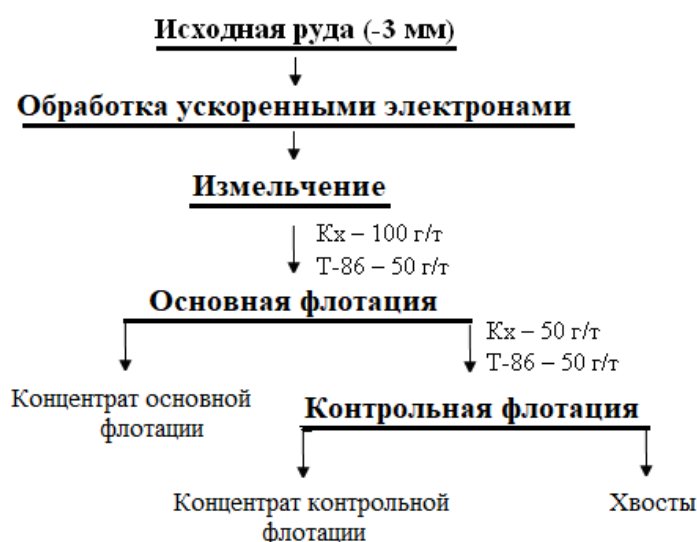


Рис. 1. Технологическая схема рудоподготовки и обогащения свинцово-цинковой руды Рубцовского месторождения



Рис. 2. Размещение транспортера и емкости с обрабатываемой рудой в помещении технологического зала ускорителя ИЛУ-6

Материал класса крупности -0.071 мм руды был подвергнут исследованию на электронном микроскопе Hitachi 3400N с целью получения сравнительной информации о раскрытии рудных минералов после воздействия ускоренными электронами.

О характере взаимосвязи элементов свидетельствуют данные рис. 3, на котором для примера приведено распределение элементов на выбранном анализируемом участке исходной руды.

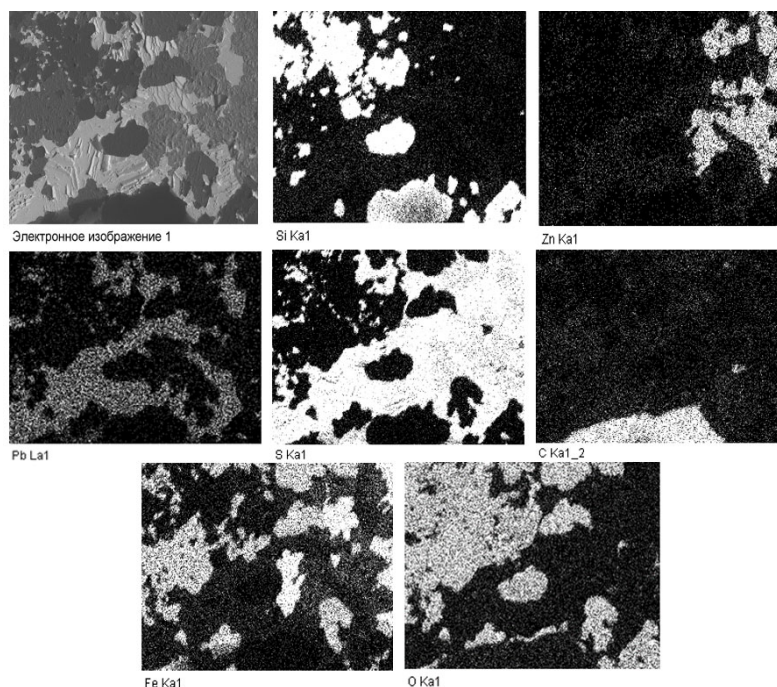


Рис. 3. Распределение химических элементов на анализируемом участке руды (светлыми точками показано, где расположен соответствующий химический элемент и его связь с другими химическими элементами)

Анализ рис. 3 свидетельствует о том, что кроме свинца (Pb) и цинка (Zn) материал руды представлен кремнием (Si), серой (S), железом (Fe), кислородом (O) и в меньшем количестве углеродом (C). Из показанного примера (рис. 3) видно, что свинцово-цинковая руда Рубцовского месторождения представлена сложными минеральными образованиями, в которых минералы находятся в сростках разнообразной формы. Следовательно, для эффективного обогащения этой руды необходима эффективная рудоподготовка, которая позволит раскрыть сростки минералов.

Для выявления особенностей раскрытия сростков были проведены исследования с помощью электронного микроскопа Hitachi 3400N и соответствующей программы обработки изображения SIMAGIS (рис. 4) материала класса – 0,071 мм в дробленой руде (рис. 4, а), в измельченной в течение 26 минут руде без обработки (рис. 4, б), а также в измельченной при том же времени руде с предварительной ее обработкой ускоренными электронами (рис. 4, в).

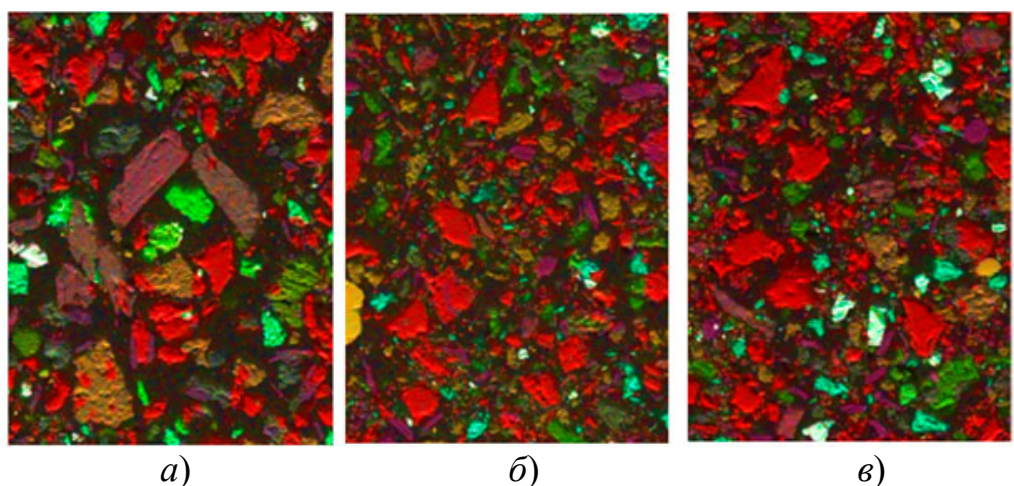


Рис. 4. Фотографии шлифов из класса -0,071 мм дробленой (а) и измельченной руды: б – без обработки; в – с обработкой ускоренными электронами при дозе 5 кГр.

Цвет минералов: красный – кварц- SiO_2 ; оранжевый – магнетит- Fe_3O_4 ; салатовый – пирит- FeS_2 ; сине-зеленый – вюрцит, модификация сфалерита- ZnS ; белый – галенит- PbS ; темнозеленый – кальцит- CaCO_3 ; фиолетовый – ортоклаз, разновидность калиевого полевого шпата; бежевый – герцинит- FeAl_2O_4

С помощью программы INCA «Oxford Instruments» производилось построение карт распределения элементов и карт минералов. После соответствующей их обработки с использованием программы «SNAGIT 7» осуществлялся подсчет свободных зерен и сростков минералов и определялись их характеристики.

На рис. 5 приведены карты минералов для класса -0,071 мм дробленой и измельченной при одинаковых условиях свинцово-цинковой руды, в том числе с предварительной ее обработкой ускоренными электронами при дозе 5 кГр.

В табл. 3 приведены характеристики по раскрытию основных наиболее ценных минералов в рудном сырье в классе -0,071 мм для указанных материалов.

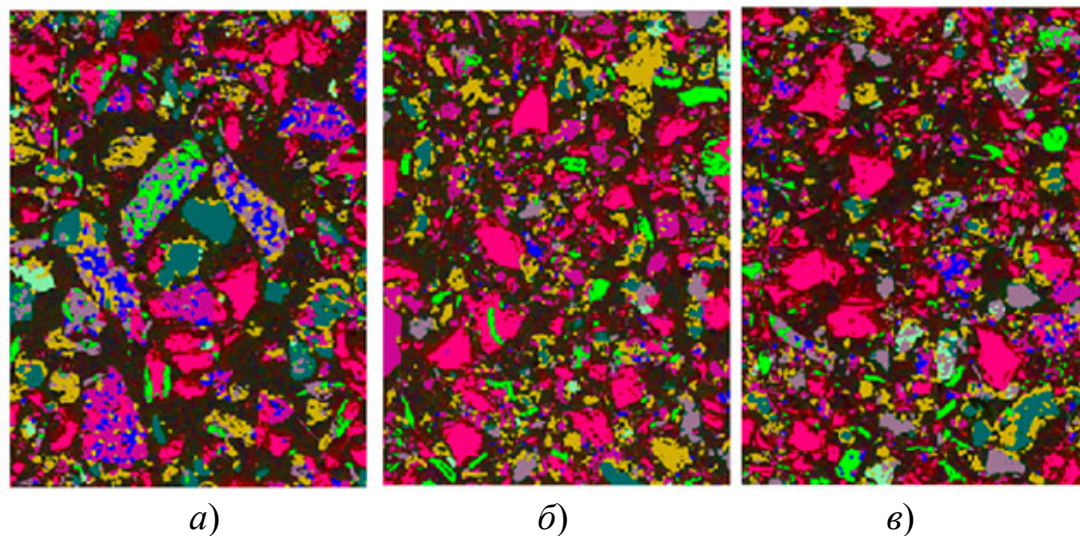


Рис. 5. Фотографии карты минералов для класса -0,071 мм дробленной (а) и измельченной руды: б – без обработки; в – с обработкой ускоренными электронами при дозе 5 кГр.

Цвета минералов соответствуют рис. 4

Таблица 3

Раскрытие зерен основных минералов в классе -0,071 мм дробленной, измельченной и предварительно разупрочненной свинцово-цинковой руды

Минерал	Доля свободных зерен, %	Средний размер, мкм	
		Свободных зерен	Сростков
Материал класса -0,071 мм в дробленной до -3 мм руде			
Галенит	22,9	3,5	12,0
Вюрцит (сфалерит)	40,1	6,5	13,5
Материал класса -0,071 мм в измельченной руде			
Галенит	40,7	2,6	6,0
Вюрцит (сфалерит)	65,7	4,5	12,0
Материал класса -0,071 мм в измельченной предварительно разупрочненной руде			
Галенит	66,4	4,0	8,0
Вюрцит (сфалерит)	71,5	6,6	10,25

Анализ данных, приведенных в табл. 3 показывает, что предварительная (перед измельчением) обработка свинцово-цинковой руды крупностью -3 мм ускоренными электронами позволяет повысить уровень раскрытия зерен минералов при последующем измельчении. Если в классе -0,071 мм измельченной в течение 26 минут свинцово-цинковой руды без обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита (модификации сфалерита) составляет 40,7 и 65,7%, то при использовании предварительной обработки руды доля свободных зерен указанных минералов повышается до 66,4% и 71,5%. Следует отметить, что обработка ускоренными электронами позволяет получить измельченный материал, в котором свободные зерна минералов в меньшей степени переизмельчаются. Для галенита крупность свободных зерен повышается с 2,6 до 4,0 мкм, а для вюрцита – с 4,5 до 6,6 мкм.

Таким образом, на примере труднообогатимой свинцово-цинковой руды крупностью -3 мм получены экспериментальные данные, подтверждающие повышение селективности дезинтеграции минерального сырья и улучшение раскрытия сростков при использовании обработки ускоренными электронами руды указанной крупности. Полученные минералогические данные объясняют ранее полученный результат по совершенствованию флотационного обогащения указанной свинцово-цинковой руды с приростом извлечения цинка 4,74% и свинца 9,50% в концентрат основной флотации после обработки руды ускоренными электронами при дозе 5 кГр.

Заключение

Получены экспериментальные данные, подтверждающие повышение селективности дезинтеграции обработанного пучком высокоэнергетических электронов минерального сырья и улучшение раскрытия сростков полезных минералов. На примере труднообогатимой свинцово-цинковой руды показано повышение селективности дезинтеграции минерального сырья и улучшение раскрытия полезных минералов. Установлено, что если в классе -0,071 мм измельченной свинцово-цинковой руды без обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита (модификации сфалерита) составляет 40,7 и 65,7%, то при использовании предварительной обработки руды доля свободных зерен указанных минералов повышается до 66,4 и 71,5%. Обработка руды ускоренными электронами позволяет получить измельченный материал, в котором свободные зерна минералов в меньшей степени переизмельчаются. Для галенита крупность свободных зерен повышается с 2,6 до 4,0 мкм, а для вюрцита – с 4,5 до 6,6 мкм.

Работа выполнена в рамках проекта НИР, № госрегистрации АААА-А17-117092750073-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.) «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г.
3. Шадрунова И.В., Зелинская Е.В. Перспективные процессы и технологии для переработки техногенного минерального сырья / Материалы Международной конференции «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке» (Плаксинские чтения – 2019). Иркутск: 2019. С. 34–37.
4. Решение Международной конференции «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке» (Плаксинские чтения – 2019). г. Иркутск, 9-14 сентября 2019 г.
5. Ростовцев В.И. Исследования временных изменений физико-механических и акустических свойств гранита после его обработки ускоренными электронами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 2 : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 4. – С. 265–273.
6. Ростовцев В.И. Изменение скорости распространения упругих волн в граните после радиационной обработки и перспективы снижения энергозатрат при рудоподготовке / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. – № 2. – С. 169-175.
7. Ростовцев В.И. Совершенствование рудоподготовки на основе модификации физико-механических свойств минерального сырья энергетическими воздействиями / Материалы Международной конференции «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке» (Плаксинские чтения – 2019). – Иркутск: 2019. С. 111-114.
8. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Каюмов А.А., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.Ю. О влиянии структурных особенностей и характера взаимосвязи минералов на выбор способов разделения свинецсодержащих руд / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 5, С. 133–143.
9. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Каюмов А.А. Теория и практика разделения минералов массивных упорных полиметаллических руд цветных металлов. – М.: Издательство «Горная книга», 2019. – 512 с.

© В. И. Ростовцев, С. А. Кондратьев, 2020