

УДК 622.7

**ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И КОМПЛЕКСНОСТИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ  
НА ОСНОВЕ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ЕГО СВОЙСТВ**

**В. И. Ростовцев<sup>1</sup>, А. А. Брызгин<sup>2</sup>, М. В. Коробейников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: benevikt@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
просп. Академика Лаврентьева, 11, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию рудоподготовки и обогащения труднообогатимого минерального сырья на примере руд Рубцовского месторождения. Установлено, что радиационная модификация свойств свинцово-цинковой руды позволяет повысить селективность измельчения и улучшить технологические показатели переработки. Выявлено, что при использовании радиационной обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита в измельченном материале повышается с 40.7 и 65.7 % до 66.4 и 71.5 % ускоренными электронами при дозе 5 кГр. При флотационном обогащении этой руды получен прирост извлечения цинка 4.74 и свинца 9.50 % в концентрат основной флотации.

*Минеральное сырье, радиационная модификация, селективность дезинтеграции, раскрытие полезных минералов, свинцово-цинковая руда, флотация*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200612

Минерально-сырьевой сектор России обеспечивает более 30 % внутреннего валового продукта и свыше 70 % валютных поступлений в бюджет страны. Экономическое благополучие страны зависит от эффективности использования и состояния минерально-сырьевой базы, развитие которой предполагает вовлечение в разработку месторождений труднообогатимых руд и освоение техногенных минеральных образований. В связи с этим первостепенной для отрасли и государства становится задача ресурсосбережения и применения техногенных ресурсов. Важнейший аспект ее решения — необходимость разработки и внедрения новых технологий первичной переработки минерального сырья и технологий для реализации отходов с целью доизвлечения из них ценных компонентов.

В настоящее время технологии переработки твердого минерального сырья многократно усложнились ввиду перехода на труднообогатимые тонковкрапленные и бедные руды, в которых целевые минералы переизмельчаются и теряются со шламами [1–3]. До 40 % потерь ценных компонентов при первичной переработке связано со сростками и до 35 % — с тонкими части-

цами крупностью < 10 мкм [4]. В России с 2014 г. осуществляется переход к наилучшим доступным технологиям, официально стартовавший после принятия Федерального закона № 219-ФЗ, согласно которому предприятия должны внедрять экономически рентабельные технологии с минимальным образованием отходов и выбросов [5, 6].

По количеству и качеству балансовых запасов минерального сырья в России с учетом наличия или отсутствия геологических перспектив наращивания минерально-сырьевой базы полезные ископаемые можно разделить на три группы [6]. В первую входят полезные ископаемые, запасы которых при любых сценариях развития экономики удовлетворят необходимые потребности до 2035 г. и в последующий период: 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, у которых достигнутые уровни добычи недостаточно снабжены запасами разрабатываемых месторождений на период до 2035 г.: нефть, свинец, сурьма, золото, серебро, алмазы, цинк, особо чистое кварцевое сырье. В третью группу включают дефицитные полезные ископаемые, внутреннее потребление которых обеспечивается вынужденным импортом и/или складированными запасами: 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.

Среди приоритетов научно-технологического развития в сфере геологического изучения недр, поисков, оценки и разведки месторождений полезных ископаемых в [5] указаны следующие работы:

- создание 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 [7] отмечается необходимость создания высокоэффективных энергосберегающих технологий рудоподготовки и селективной дезинтеграции труднообогатимого и техногенного минерального сырья; научного обоснования изменений структурных, физико-химических, технологических свойств минералов при комбинированных физико-химических и энергетических воздействиях на геоматериалы и минеральные суспензии для повышения извлечения микро- и наночастиц ценных компонентов из нетрадиционного минерального сырья.

Для снижения потерь полезных компонентов при переработке тонковкрапленных руд из-за образования сrostков и для устранения излишнего переизмельчения традиционные процессы дробления и измельчения в щековых, конусных дробилках и шаровых мельницах должны быть заменены селективной дезинтеграцией [8, 9]. Дезинтеграция минерального сырья — основная технологическая операция при рудоподготовке, задача которой состоит в раскрытии сrostков полезных компонентов между собой и с породными ингредиентами и в приближении крупности получаемых частиц к размерам кристаллов минералов в рудах. Для раскрытия тонковкрапленного минерального сырья перспективны нетрадиционные немеханические способы разрушения, обеспечивающие селективную дезинтеграцию по межфазным границам за счет образования микротрещин и каналов пробоя в результате энергетических воздействий. К ним относятся электрохимическая, СВЧ-, электроимпульсная, электрогидродинамическая, электроплазменная, магнитно-импульсная обработка; воздействие потоком ускоренных электронов, сверхмощными гиперударными волнами, мощными наносекундными электромагнитными импульсами; другие методы

предварительной обработки минерального сырья [10–13]. Высокая эффективность энергетических методов при обогащении подтверждается исследованиями зарубежных ученых из Канады, Германии, Японии, ЮАР и др. Радиационные технологии определены мировым научным сообществом как потенциально прорывные в различных областях промышленного производства. Радиационная обработка широко используется для модификации полимеров, стерилизации медицинских изделий, обеззараживания бытовых отходов, очистки стоков промышленных предприятий и дымовых газов. По данным МАГАТЭ, во всем мире в промышленности работают более 1400 мощных ускорителей электронов, создающих добавочную стоимость свыше 85 млрд долл. в год. Выдающийся российский ученый И. Н. Плаксин считал, что одно из важных направлений при обогащении — поиск энергетических воздействий, повышающих полноту и комплексность использования минерального сырья [14]. Он обосновал эффективность применения внешних энергетических воздействий при обогащении полезных ископаемых.

Исследования ИГД СО РАН и 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 и повышать раскрываемость сростков в рудах при последующей дезинтеграции [15–17]. Анализ проб минерального сырья различных месторождений выявил, что они полиминеральные и большая часть представлена порообразующими минералами и горными породами, например известняком, роговиком, гранитом.

В [15–17] приведены результаты экспериментальных исследований механических свойств керновых образцов известняка, роговика и гранита, обработанных ускоренными электронами и приводящих к изменению деформационно-прочностных свойств минералов. Установлена оптимальная доза обработки гранита ускоренными электронами (10 кГр), при которой прочность при одноосном сжатии уменьшается с 68.33 до 35.08 МПа, а модуль деформации — с 13.19 до 7.04 ГПа. Определено изменение соотношения скоростей продольных и поперечных волн в зависимости от дозы. Возможность разупрочнения минералов и руд при воздействии ускоренными электронами может использоваться для снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья и минимизации потерь полезных компонентов в последующем обогащении. Показана динамика изменения прочностных свойств минерального сырья от времени после его обработки ускоренными электронами.

Получение данных по селективной дезинтеграции и раскрытию минералов при рудоподготовке необходимо для технологического применения рациональных процессов при обогащении минерального сырья. Интенсификация рудоподготовки и обогащения свинцово-цинковых руд актуальна для многих месторождений Российской Федерации в регионах Сибири, Алтая, Забайкалья, Урала [18]. Большинство руд сложные, упорные и труднообогатимые. К колчеданным месторождениям вулканогенного происхождения относятся Тишинское, Степное, Рубцовское, Таловское, Озерное (Забайкалье) месторождения России, а также месторождения Казахстана (Жайремское, Лениногорское и др.) [19].

Цель настоящей работы — получение экспериментальных данных, подтверждающих повышение селективности дезинтеграции радиационно-модифицированного пучком высокоэнергетических электронов труднообогатимого свинцово-цинкового минерального сырья Рубцовского месторождения и улучшение технологических показателей его обогащения флотационным способом.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовалось влияние радиационного воздействия на результаты рудоподготовки свинцово-цинковой руды Рубцовского месторождения. Полезные минералы в этой руде — галенит, вюрцит (разновидность сфалерита), пирит, магнетит. Среднее процентное содержание металлов в ней достигает 6.2 для Fe; 2.3 — Pb и 4.9 — Zn. В состав породной части входят кварц, кальцит и ортоклаз. Доля смешанного сульфида составляла 90–95 %. В руде представлены следующие типы текстур гидротермальных отложений: массивная, пятнистая, вкрапленная, колломорфная и др. Для исследованной пробы характерно неравномерное распределение минералов в руде. Перед измельчением руду раздробили с помощью щековой дробилки до крупности – 3 мм и разделили на образцы для изучения 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 + 0.50	22.70	2.11	4.75	5.87	20.89	22.00	21.50
– 0.50 + 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

Для последующего флотационного обогащения свинцово-цинковой руды необходима крупность материала ~ 80 % класса – 0.071 мм, поэтому 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, изготовленного фирмой ФРИЧ (ФРГ). Необходимую для флотационного обогащения крупность измельченной руды (80 % класса – 0.071 мм) можно получить при измельчении в течение 26 мин (табл. 2). Это время измельчения принято в дальнейших исследованиях по радиационной модификации обработкой потоком ускоренных электронов свинцово-цинковой руды Рубцовского месторождения.

ТАБЛИЦА 2. Кинетика измельчения дробленной руды крупностью – 3 мм

Класс, мм	Время измельчения, мин			
	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

Для выявления особенностей раскрытия минеральных сростков проведены испытания с помощью электронного микроскопа Hitachi 3400N и программы обработки изображения SIMAGIS. Объект исследований — материал класса  $-0.071$  мм в дробленной руде, в измельченной в течение 26 мин руде без обработки, а также в измельченной при том же времени руде с предварительной обработкой ускоренными электронами.

На рис. 1 показано распределение элементов на выбранном анализируемом участке исходной руды, свидетельствующее о характере взаимосвязи химических элементов. Кроме свинца и цинка, материал руды включает кремний, серу, железо, кислород и углерод в меньшем количестве. Свинцово-цинковая руда Рубцовского месторождения представлена сложными минеральными образованиями, в которых минералы находятся в сростках разнообразной формы. Для ее эффективного обогащения необходима рудоподготовка, позволяющая раскрыть сростки минералов.

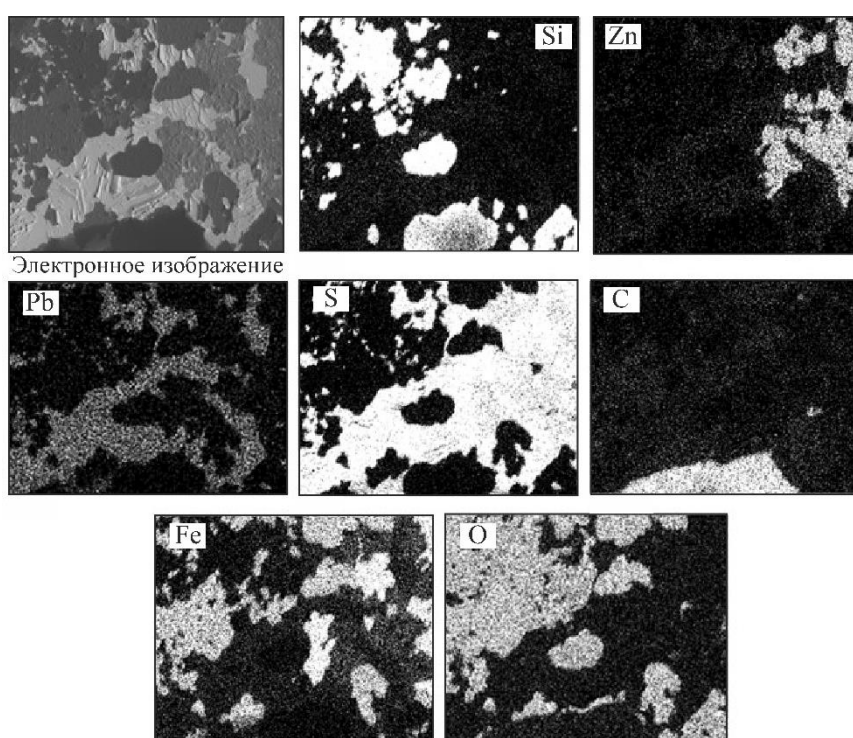


Рис. 1. Распределение химических элементов на анализируемом участке руды. Светлыми точками показано расположение химического элемента и его связь с другими элементами

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представлены основные результаты исследований по повышению селективности раскрытия полезных и породных минералов при рудоподготовке и обогащении труднообогатимого полиминерального сырья Рубцовского месторождения с предварительной радиационной модификацией. Технологическая схема рудоподготовки и обогащения руды приведена на рис. 2. Расход реагентов во всех опытах по флотации одинаковый и составляет в основной флотации: собиратель — ксантогенат бутиловый Кх 100 г/т, вспениватель — Т-86 50 г/т; в контрольной: ксантогенат бутиловый Кх 50 г/т, Т-86 — 50 г/т. Обработка руды для разупрочнения осуществлялась электронным пучком на промышленном ускорителе ИЛУ-6 ИЯФ СО РАН.

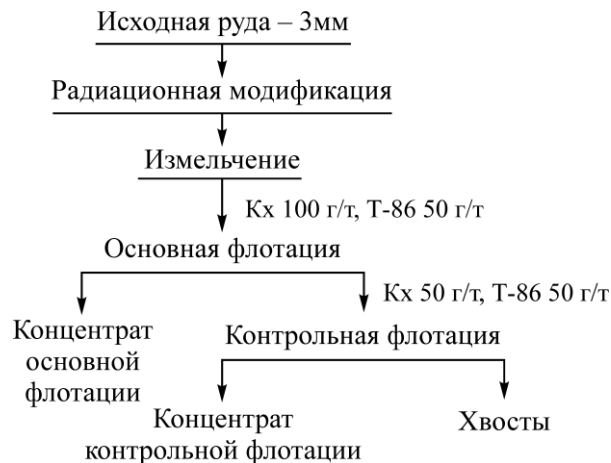


Рис. 2. Технологическая схема рудоподготовки и обогащения свинцово-цинковой руды Рубцовского месторождения

На рис. 3 показан фрагмент технологического зала промышленного ускорителя ИЛУ-6 ИЯФ СО РАН. Видна нижняя часть ускорителя, под которым расположено транспортирующее устройство. На транспортере находится емкость из нержавеющей стали, в которую для радиационной обработки помещена исходная свинцово-цинковая руда крупностью – 3 мм и массой 200 г.



Рис. 3. Размещение транспортера и емкости с обрабатываемой рудой в помещении технологического зала ускорителя ИЛУ-6

На рис. 4 показаны изображения шлифов материала класса –0.071 мм в дробленной руде (рис. 4а), в измельченной в течение 26 мин руде без обработки (рис. 4б), а также в измельченной при том же времени руде с предварительной обработкой ускоренными электронами (рис. 4в).

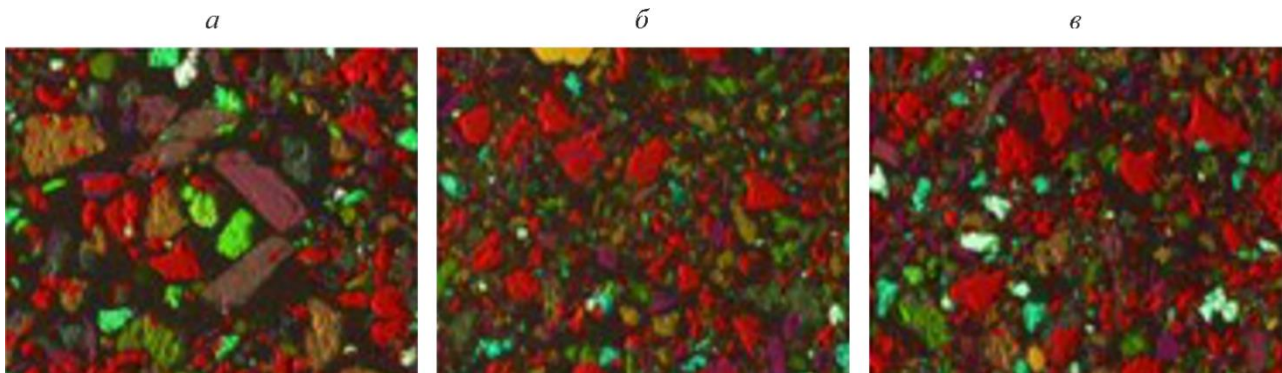


Рис. 4. Шлифы из класса –0.071 мм дробленной (а) и измельченной руды без обработки (б) и с обработкой (в) ускоренными электронами при дозе 5 кГр. Белым цветом обозначен галенит PbS



С помощью программы INCA “Oxford Instruments” строились карты распределения элементов и минералов. После их обработки с использованием программы SNAGIT 7 подсчитывались свободные зерна и сростки минералов, определялись их характеристики. На рис. 5 приведены карты минералов для класса –0.071 мм дробленной и измельченной при одинаковых условиях свинцово-цинковой руды, в том числе с предварительной обработкой ускоренными электронами при дозе 5 кГр.

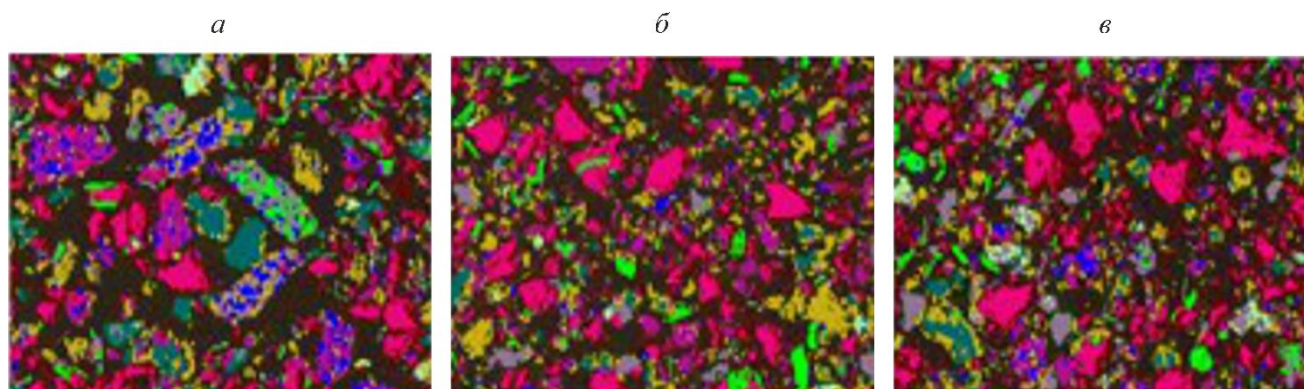


Рис. 5. Карты минералов для класса –0.071 мм дробленной (а) и измельченной руды без обработки (б) и с обработкой (в) ускоренными электронами при дозе 5 кГр. Белым цветом обозначен галенит PbS

В табл. 3 приведены характеристики раскрытия основных минералов в рудном сырье в классе –0.071 мм. Расчеты выполнены для карт минералов на рис. 5. Предварительная обработка свинцово-цинковой руды крупностью –3 мм ускоренными электронами позволяет повысить уровень раскрытия зерен минералов при последующем измельчении. В классе –0.071 мм измельченной в течение 26 мин свинцово-цинковой руды без обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита составляет 40.7 и 65.7 %, а при предварительной обработке руды — 66.4 и 71.5 %. Увеличивается доля свободных зерен других основных минералов. С помощью обработки ускоренными электронами можно получить измельченный материал, в котором свободные зерна минералов меньше переизмельчаются. Для галенита крупность свободных зерен повышается с 2.6 до 4.0 мкм, для вюрцита — с 4.5 до 6.6 мкм. Эта закономерность прослеживается и для других минералов, в том числе породных.

В табл. 4 показаны сравнительные данные по флотации руды в соответствии с технологической схемой на рис. 2. Результаты свидетельствуют о возможности интенсификации флотационного обогащения свинцово-цинковой руды за счет радиационной модификации ее свойств при воздействии высокоэнергетическими ускоренными электронами перед измельчением. Более высокие технологические показатели флотационного процесса связаны с лучшим раскрытием сростков, вследствие чего не только повысилось извлечение цинка и свинца в концентрат основной флотации, но и снизились потери металлов с хвостами.

Прирост извлечения цинка и свинца в концентрат основной флотации после обработки руды ускоренными электронами составил 4.74 и 9.50 %. Определены оптимальные параметры пучка ускоренных электронов для обработки руды: доза 5 кГр, частота 25 Гц, энергия 3.5 МэВ. Из табл. 4 следует, что обработка руды возможна при дозе 5 кГр, частоте 5 Гц и энергии 1.8 МэВ. Прирост извлечения цинка и свинца в концентрат основной флотации составил 3.24 и 4.99 %.

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 руде до –3 мм			
Галенит	22.9	3.50	12.00
Вюрцит (сфалерит)	40.1	6.50	13.50
Пирит	21.9	5.50	14.00
Магнетит	39.8	6.50	21.50
Герцинит	26.9	3.25	8.75
Кальцит	50.6	5.50	18.00
Кварц	84.0	10.00	15.50
Ортоклаз	50.3	6.75	14.50
Материал класса –0.071 мм в измельченной руде			
Галенит	40.7	2.60	6.00
Вюрцит (сфалерит)	65.7	4.50	12.00
Пирит	40.4	3.00	10.50
Магнетит	62.5	3.50	13.50
Герцинит	33.0	2.75	5.75
Кальцит	74.7	4.50	16.50
Кварц	85.7	9.00	13.00
Ортоклаз	68.0	2.75	11.25
Материал класса –0.071 мм в измельченной радиационно-модифицированной руде при дозе 5 кГр			
Галенит	66.4	4.00	8.00
Вюрцит (сфалерит)	71.5	6.60	10.25
Пирит	49.3	3.50	15.75
Магнетит	65.5	3.75	8.50
Герцинит	48.3	3.25	8.50
Кальцит	79.2	6.00	8.50
Кварц	93.4	15.25	19.75
Ортоклаз	78.4	8.00	9.25

ТАБЛИЦА 4. Влияние обработки руды ускоренными электронами на результаты флотации измельченной свинцово-цинковой руды, %

Условие обработки руды	Продукт флотации	Выход	Содержание		Извлечение	
			Zn	Pb	Zn	Pb
Без обработки	Концентрат основной	31.70	10.90	3.87	70.60	53.37
	Концентрат контрольный	20.40	4.87	2.86	20.30	25.38
	Хвосты	47.90	0.93	1.02	9.10	21.25
	Всего	100.00	4.89	2.30	100.00	100.00
Доза 5 кГр Частота 25 Гц Энергия 3.5 МэВ	Концентрат основной	32.80	11.26	4.41	75.34	62.87
	Концентрат контрольный	19.70	4.93	2.89	19.81	24.74
	Хвосты	47.50	0.50	0.60	4.85	12.39
	Всего	100.00	4.90	2.30	100.00	100.00
Доза 5 кГр Частота 5 Гц Энергия 1.8 МэВ	Концентрат основной	34.50	10.48	3.89	73.84	58.36
	Концентрат контрольный	21.50	4.30	2.51	18.88	23.47
	Хвосты	44.00	0.81	0.95	7.28	18.18
	Всего	100.00	4.90	2.30	100.00	100.00

Примечание. Содержание в руде элементов, %: Pb — 2.3, Zn — 4.9, Fe — 6.2.



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 руды указанной крупности ускоренными электронами. Эти минералогические данные объясняют результат совершенствования флотационного обогащения 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 и частоте 25 Гц.

К числу лучших доступных технологий в области переработки минерального сырья можно отнести технологии рудоподготовки и обогащения руд с использованием радиационной модификации их свойств путем обработки пучком высокоэнергетических электронов. Воздействие высокоэнергетических частиц и излучения на твердые тела приводит к изменению структурно-фазового состояния и физических свойств. В основе радиационных методов обработки лежат первичные этапы взаимодействия заряженных частиц и излучения с твердым телом и последующие появления в нем структурных дефектов, что является основным инструментом радиационных технологий XXI в. [20]. В настоящее время исследования в этой области направлены на проектирование материалов для ядерных и термоядерных реакторов деления и синтеза, а также на радиационно-стимулированную модификацию свойств материалов и создание новых структур.

Достоинство таких воздействий потоком ускоренных электронов — наличие отечественного стандартного оборудования и комплектующих для реализации производственных процессов обработки минерального сырья, при этом не требуется изменять технологические схемы и оборудование обогатительных фабрик [21, 22]. В условиях вовлечения в переработку труднообогатимых и упорных руд сложного вещественного состава, характеризующихся тонкой вкрапленностью и близкими свойствами минералов, применение интенсифицирующих технологий и технологических режимов с помощью радиационной модификации свойств минерального сырья позволит расширить рамки минерально-сырьевой базы страны по стратегически важным металлам за счет повышения селективности измельчения и комплексности использования твердых полезных ископаемых.

## ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные данные, подтверждающие повышение селективности дезинтеграции радиационно-модифицированного минерального сырья и улучшение раскрытия сростков полезных минералов. Минералогическими исследованиями на примере труднообогатимой свинцово-цинковой руды показано, что в классе –0.071 мм измельченной свинцово-цинковой руды без обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита составляет 40.7 и 65.7 %, а при использовании радиационной модификации свойств руды — 66.4 и 71.5 %. Радиационная модификация свойств руды при ее обработке пучком высокоэнергетических электронов позволяет получить измельченный материал, в котором свободные зерна минералов меньше переизмельчаются. Для галенита крупность свободных зерен увеличивается с 2.6 до 4.0 мкм, для вюрцита — с 4.5 до 6.6 мкм. Эти закономерности установлены и для других минералов в руде.

Технологическими исследованиями определен прирост извлечения цинка 4.74 и свинца 9.50 % в концентрат основной флотации после обработки руды ускоренными электронами при дозе 5 кГр, частоте 25 Гц, энергии 3.5 МэВ. Выявлена возможность обработки руды при дозе 5 кГр, частоте 5 Гц и энергии 1.8 МэВ. Прирост извлечения цинка и свинца в концентрат основной флотации при такой обработке составил 3.24 и 4.99 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Qi T., Wang W., Wei G., Zhu Z., Qu J., Wang L., and Zhang H.** Technical progress of green high-value utilization of strategic rare metal resources, *Guocheng Gongcheng Xuebao, Chin. J. Proc. Eng.*, 2019, Vol. 19. — P. 10–24.
2. **Perez J. P. H., Folens K., Leus K., Vanhaecke F., Van Der Voort P., and Laing G. D.** Progress in hydrometallurgical technologies to recover critical raw materials and precious metals from low-concentrated streams, *Resources, Conserv. Recycl.*, 2019, Vol. 142. — P. 177–188.
3. **Рыжова Л. П., Салей А. У.** Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы рудных месторождений в России и за рубежом // *Вест. науки и образования.* — 2018. — Т. 1. — № 5 (41). — С. 46–49.
4. **Чантурия В. А., Козлов А. П.** Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // *Плаксинские чтения – 2017: Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья.* — 2017. — С. 3–6.
5. **Федеральный закон № 219-ФЗ** “О внесении изменений в Федеральный закон “Об охране окружающей среды” и отдельные законодательные акты Российской Федерации” от 21.07.2014 г.
6. **Распоряжение Правительства РФ № 2914-р** “О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г.” от 22.12.2018 г.
7. **Решение Международной конференции** // *Плаксинские чтения – 2019: Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в XXI веке*. — Иркутск, 2019 г.
8. **Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др.** Селективное разрушение минералов / под ред. В. И. Ревнивцева. — М.: Недра, 1988. — 286 с.
9. **Вайсберг Л. А., Загоратский Л. П.** Основы оптимальной дезинтеграции минералов // *ФТПРПИ.* — 2003. — № 1. — С. 99–106.
10. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А.** Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // *Горн. журн.* — 2020. — № 5. — С. 39–46.
11. **Чантурия В. А., Бунин И. Ж.** Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // *ФТПРПИ.* — 2007. — № 3. — С. 107–128.
12. **Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е.** Научные основы и перспективы промышленного использования энергии ускоренных электронов в обогатительных процессах // *Горн. журн.* — 1995. — № 7. — С. 53–57.
13. **Bochkarev G. R., Chanturiya V. A., Vigdergaus V. E., Lunin V. D., Viigelt Yu. P., Rostovtsev V. I., Voronin A. P., Auslender V. L., and Polyakow V. A.** Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing, *Proc. XX Int. Miner. Proc. Congr.*, 21–26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol. 1. — P. 231–243.
14. **Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш., Чантурия В. А., Якушкин В. П.** О влиянии ионизирующих излучений на флотационные свойства некоторых минералов // *Обогащение полезных ископаемых: избр. тр.* — М.: Наука, 1970. — С. 292–300.
15. **Бакшеева И. И., Бурдакова Е. А., Кулагин О. Р., Кулагин Р. А., Ростовцев В. И., Сиволап Б. Б., Брызгин А. А., Коробейников М. В.** Модификация прочностных свойств керновых образцов горных пород при их радиационной обработке // *Оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.* — Новосибирск: Сибпринт, 2017. — С. 81–97.

16. Ростовцев В. И., Кулагин О. Р., Сиволап Б. Б., Брызгин А. А., Коробейников М. В. Исследование влияния электрохимической обработки и предварительного разупрочнения полиминерального сырья энергетическими воздействиями на результаты флотационного обогащения // Обогащение рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Агентство “Сибпринт”, 2020. — С. 181–205.
17. Ростовцев В. И. Изменение скорости распространения упругих волн в граните после радиационной обработки и перспективы снижения энергозатрат при рудоподготовке // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 169–175.
18. 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 // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 133–143.
19. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А. Теория и практика разделения минералов массивных упорных полиметаллических руд цветных металлов. — М.: Горн. кн., 2019. — 512 с.
20. Углов В. В. Радиационные процессы и явления в твердых телах. — Мн.: Высш. шк., 2016. — 188 с.
21. Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Брызгин А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН // Успехи физ. наук. — 2018. — Т. 188. — № 6. — С. 672–685.
22. Безуглов В. В., Брызгин А. А., Власов А. Ю., Воронин Л. А., Коробейников М. В., Максимов С. А., Нехаев В. Е., Радченко В. М., Сидоров А. В., Ткаченко В. О., Факторович Б. Л. Радиационные технологии и оборудование // Вопр. атомной науки и техники. Техническая физика и автоматизация. — М.: АО “НИИТФА”, 2018. — Вып. 83. — С. 4–21.

*Поступила в редакцию 06/X 2020*

*После доработки 17/X 2020*

*Принята к публикации 03/XI 2020*