

*А. К. Салчак<sup>1,2</sup>, В. И. Ростовец<sup>1\*</sup>*

## **Особенности минерального состава полиметаллической руды и технология ее предварительного обогащения**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Обогатительная фабрика ООО «Лунсин», г. Кызыл, Республика Тыва, Российская Федерация

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\*e-mail: benevikt@misd.ru

**Аннотация.** В связи с необходимостью развития минерально-сырьевой базы России в переработку все в большей степени вовлекаются бедные, труднообогащаемые и упорные руды, в том числе и полиметаллические. Из-за сложного их минерального состава и несовершенства добычных и обогатительных технологий на предприятиях уровень потерь ценных компонентов достигает 20 и более %. Совершенствование технологических процессов переработки природного и техногенного минерального сырья является актуальной задачей. Цель исследований: обоснование применения комбинированной технологии переработки полиметаллической руды, обеспечивающей повышение технологических показателей при одновременном снижении себестоимости получения товарной продукции и улучшении экологической обстановки на предприятии. При выполнении работы использованы минералогический, флотационный, ситовый, рентгенорадиометрический (РРС), химический и другие методы исследований. Установлено, что в оптимальном режиме рентгенорадиометрическое разделение руды позволяет выделить из класса -80+20 мм порядка 20 % пород при сравнительно низких потерях (около 8 % свинца и 3 % цинка). Учитывая опыт применения РРС на ряде предприятий, предварительное обогащение с применением этого метода на отечественном оборудовании целесообразно провести на труднообогащаемых и забалансовых рудах Кызыл-Таштыгского месторождения. При этом одновременно с повышением технологических показателей будет снижена себестоимость товарной продукции из-за снижения нагрузки на основное технологическое оборудование и сокращения сбросов тонкоизмельченного материала в хвостохранилище обогатительной фабрики за счет предварительного удаления из руды пустой породы в виде крупных кусков.

**Ключевые слова:** полиметаллические руды, совершенствование переработки, предварительное обогащение, комбинирование технологических процессов, снижение себестоимости товарной продукции, улучшение экологической обстановки на предприятии

*А. К. Salchak<sup>1,2</sup>, V. I. Rostovtsev<sup>1\*</sup>*

## **Features of the mineral composition of polymetallic ore and technology of its pre-enrichment**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup>"Lunsin" LLC Enrichment plant, Kyzyl, Republic of Tyva, Russian Federation

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

\*e-mail: benevikt@misd.ru

**Abstract.** Due to the need to develop the mineral resource base of Russia, poor, hard-to-enrich and stubborn ores, including polymetallic ores, are increasingly involved in processing. Due to their complex mineral composition and imperfections of mining and processing technologies at enterprises, the loss rate of valuable components reaches 20% or more. Improving the technological processes of processing natural and man-made mineral raw materials is an urgent task. The purpose of the research is to substantiate the use of a combined technology for processing polymetallic ore, which provides an increase in technological indicators while reducing the cost of obtaining marketable products and improving the environmental situation at the enterprise. Mineralogical, flotation, sieve, X-ray radiometric, chemical and other research methods were used in the performance of the work. It was found that in the optimal mode, the X-ray radiometric separation of ore makes it possible to isolate about 20% of rocks from the -80+20 mm class with relatively low losses (about 8% lead and 3% zinc). Taking into account the experience of using RRS at a number of enterprises, it is advisable to carry out preliminary enrichment using this method on domestic equipment at the difficult-to-enrich and off-balance ores of the Kyzyl-Tashtyg deposit. At the same time, along with an increase in technological indicators, the cost of commercial products will be reduced due to a reduction in the load on the main technological equipment and a reduction in discharges of finely ground material into the tailings of the concentrator due to the preliminary removal of waste rock from the ore in the form of large pieces.

**Keywords:** polymetallic ores, improvement of recycling, pre-enrichment, combining technological processes, reducing the cost of commercial products, improving the environmental situation at the enterprise

### *Введение*

Как известно, например, из [1], эффективное функционирование минерально-сырьевого комплекса России определяется уровнем развития технологий добычи и обогащения полезных ископаемых. Вероятность открытия новых крупных и богатых месторождений не велика. Поэтому, расширение минерально-сырьевой базы России возможно, главным образом, за счёт вовлечения в разработку труднообогатимых руд и нетрадиционного минерального сырья, включая техногенные образования. Данные типы руд характеризуются сложным вещественным составом, низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью вплоть до эмульсионной и близкими физико-химическими и технологическими свойствами.

Проблема разделения минералов с близкими технологическими свойствами традиционно решается повышением селективности обогатительных и химических процессов. Научные исследования в настоящее время ведутся по нескольким направлениям: синтез реагентов направленного действия и использование энергетических методов обработки минералов, пульпы и промышленных вод.

Для эффективной реализации данных химических процессов необходимо получение новых научных знаний о процессах растворения, сорбции и экстракции ценных компонентов, и разработка нового класса эффективных флотационных реагентов, сорбентов и экстрагентов.

Одним из эффективных методов, позволяющих получать качественные концентраты из такого минерального сырья, является флотация. При этом важным фактором, определяющим эффективность флотационного процесса, является

размер свободных зерен минеральных частиц. Например, расширение диапазона крупности частиц во флотационной пульпе до 0.1 – 0.3 мм может дать экономию 30 – 50 % энергии, затрачиваемой в наиболее энергоемком переделе обогащения – процессе измельчения [2, 3].

В последние годы для направленного изменения поверхностных свойств минералов проводятся широкие исследования по использованию энергетических воздействий, таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные. И если раньше эти направления рассматривались как экзотические, то в связи с началом выпуска промышленных электрохимических кондиционеров пульпы, плазмотронов, линейных ускорителей, ультразвуковых генераторов можно говорить о реальном внедрении новых экологически безопасных технологий в процессах первичной переработки труднообогатимых руд и угля сложного вещественного состава. Дозированные физические и физико-химические воздействия на поверхность минералов изменяют их свойства в нужном направлении и позволяют перевести труднообогатимые руды в категорию рядовых руд.

В [4] указывается, что для процессов селективной дезинтеграции в ряде стран с целью создания дефектов на границе срастания минералов разрабатываются энергетические методы воздействия на минеральное сырье (СВЧ, мощные наносекундные импульсы и т.д.). Среди указанных перспективным является воздействие потоком ускоренных электронов на минеральное сырье [5-6]. Радиационные технологии определены мировым сообществом как потенциально прорывные в различных областях промышленного производства. В настоящее время радиационная обработка широко используется для модификации полимеров, стерилизации медицинских изделий, обеззараживания бытовых отходов, очистки стоков промышленных предприятий и дымовых газов. Достоинством воздействия ускоренными электронами является наличие отечественного стандартного оборудования для реализации процессов обработки минерального сырья с сохранением или незначительным изменением технологических схем и оборудования обогатительных фабрик [7-8].

Все изложенные выше направления имеют принципиальный характер для повышения эффективности обогатительных процессов, которые в настоящее время подходят к пределу своих возможностей и становятся бессильными при переработке руд с субмикрозернистой структурой.

Другим направлением поиска и развития эффективных обогатительных технологий является предварительное обогащение [9], в котором могут решаться различные задачи, из них наиболее важной и часто решаемой является задача предварительной концентрации полезных минералов в выделенном продукте. Это обеспечивает целый ряд преимуществ из-за вывода из последующего технологического процесса большей части крупных бедных хвостов. К ним относятся снижение затрат на транспортировку, дробление, измельчение и обогащение, уменьшение платежей на эксплуатацию хвостохранилищ, снижение экологической нагрузки предприятий и, в конечном итоге, повышение эффективности горно-обогатительного производства. В последнее время среди используемых

методов предварительного обогащения приобретают особое значение информационные методы обогащения [9-12].

Цели и задачи исследований настоящей работы заключаются в обосновании применения предварительного обогащения, обеспечивающего не только снижение себестоимости получения конечной товарной продукции за счет предварительного удаления пустой породы из руды и повышения технологических и технико-экономических показателей процесса обогащения руды, но и снижение негативного влияния обогатительных предприятий на окружающую среду.

### **Методы и материалы**

Объектом исследований являлась полиметаллическая руда одного из месторождений Республики Тыва со следующим содержанием основных полезных компонентов в %: свинца – 1.28-1.47, цинка – 8.63-10.13, меди – 0.56-0.66. Для исследованной руды характерна тонкозернистая (0.04-0.01 мм) и в меньшей мере мелкозернистая структура.

Минеральный и химический составы технологической пробы приведены в таблицах 1 и 2.

*Таблица 1*

Минеральный состав пробы полиметаллической руды

Наименование минерала	Содержание, %
Пирит	23.5
Сфалерит	13.3
Халькопирит	1.0
Галенит	1.8
Барит	3.5
Халькозин	0.4
Кварц	10.2
Хлорит	2.0
Магнетит, серицит	Единичные зерна

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что основными рудными минералами являются пирит, сфалерит, галенит и халькопирит. Нерудные минералы – кварц, барит, серицит, хлорит.

Руда характеризуется тонкой вкрапленностью минералов, особенно сульфидных минералов между собой.

Фазовым анализом определено, что цинк на 90 % представлен сульфидной формой в виде сфалерита, медь в основном содержится в виде халькопирита, частично – в виде халькозина. Свинец на 25 % находится в окисленной форме.

Таблица 2

## Химический состав пробы полиметаллической руды

Элементы и соединения	Содержание, %
Свинец	1.50
Цинк	8.90
Медь	0.68
Диоксид кремния	27.61
Оксид железа	11.69
Сера	18.00
Оксид кальция	53.33
Оксид магния	4.88
Оксид алюминия	4.98
Оксид бария	2.31
Кадмий	0.03
Селен	0.07
Серебро, г/т	50
Золото, г/т	1.0

Гранулометрическая характеристика исходной дробленной до крупности -2 мм руды показана в таблице 3.

Таблица 3

## Гранулометрический состав дробленной до крупности -2 мм пробы полиметаллической руды

Класс, мм	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
+1	19.3	0.64	1.39	8.96	18.2	18.0	19.5
-1+0.5	24.6	0.67	1.38	8.84	24.4	22.7	24.5
-0.5+0.2	17.3	0.65	1.32	8.72	16.6	15.1	17.0
-0.2+0.14	4.6	0.63	1.49	8.81	4.3	4.6	4.6
-0.14+0.074	6.8	0.65	1.39	9.11	6.5	6.3	7.0
-0.074+0.044	6.4	0.69	1.59	9.27	6.5	6.8	6.7
-0.044	21.0	0.76	1.89	8.76	23.5	26.5	20.7
ИТОГО	100.0	0.68	1.50	8.90	100.0	100.0	100.0

Анализ данных таблицы 3 показывает, что распределение металлов по классам крупности пропорционально выходам. Содержание металлов равномерное за исключением флотационного класса -0.074 мм, в котором наблюдается повышенное содержание меди (0,69 - 0,76 %) и свинца (1.59 – 1.89 %). Следует отметить, что в классе -0.074 мм сосредоточено от 27.4 до 33.3 % полезных минералов.

С учетом особенностей минерального состава и согласно действующего технологического регламента [13], обогащение полиметаллических руд Кызыл-Таштыгского месторождения происходит по схеме коллективно-селективной бесцианидной флотации с получением кондиционных медного, цинкового и свинцового концентратов. Технологическая схема предусматривает 2-х стадийное измельчение руды до крупности 95% класса минус 0,074 мм, основную медно-свинцовую флотацию с 4-мя перемывками коллективного концентрата, доизмельчение коллективного медно-свинцового концентрата до крупности 90% класса минус 0,044 мм, селективный цикл флотации с получением медного и свинцового концентратов, цикл цинковой флотации с доизмельчением камерного продукта медно-свинцовой флотации до крупности 90% класса минус 0,044 мм, и 3-мя перемывками цинкового концентрата.

Технологические показатели обогащения руды приведены в таблице 4.

*Таблица 4*

Технологические показатели обогащения полиметаллической руды

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
Цинковый концентрат	13.8	54.47	1.05	1.16	84.5	9.7	23.5
Свинцовый концентрат	2.3	7.78	42.5	3.02	2.0	65.2	10.2
Медный концентрат	1.7	8.0	4.09	24.16	1.5	4.6	60.4
Хвосты	82.2	1.3	0.374	0.048	12.0	20.5	5.9
Исходная руда	100.0	8.9	1.5	0.68	100.0	100.0	100.0

### *Результаты и их обсуждение*

Анализ данных таблицы 4 показывает, что извлечение металлов в одноименные концентраты сравнительно низкое, что связано с их потерями в хвостах. Низкие показатели по извлечению металлов в концентраты несмотря на достаточно тонкое измельчение, достигающее 90-95% класса -44 мкм, связано с минералогическими особенностями руды, характеризующимися ее трудной обогатимостью и упорностью.

Как указывалось выше для комплексного использования минерального сырья и повышения технологических показателей его переработки в последнее время проводят предварительное обогащение. При этом наибольшее широко применяется рентгенорадиометрическая сепарация (РРС) [14-15]. В настоящей работе для повышения качества перерабатываемых руд и расширения минерально-сырьевой базы испытывался сепаратор СРФ2-150, являющийся полным аналогом промышленных сепараторов, производимых в России фирмой РАДОС.

Результаты исследований приведены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты испытаний по рентгенорадиометрическому разделению пробы полиметаллической руды

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Pb	Zn	Pb	Zn
Серия 1					
Обогащенный продукт	80.5	1.68	10.74	93.27	97.15
Хвосты	19.5	0.50	1.30	6.73	2.85
Исходная руда (-80+20 мм)	100.0	1.45	8.90	100.0	100.0
Серия 2					
Обогащенный продукт	76.6	1.72	11.19	90.96	96.29
Хвосты	23.4	0.56	1.41	9.04	3.71
Исходная руда (-80+20 мм)	100.0	1.45	8.90	100.0	100.0

### *Заключение*

Результаты поисковых исследований, показанных в таблице 5, показывают, что при использовании РРС на руде текущей добычи можно выделить порядка 20 % пород от руды крупностью -80+20 мм при потерях около 8 % свинца и 3 % цинка.

Учитывая опыт реализации РРС на ряде предприятий, предварительное обогащение с применением этого метода на отечественном оборудовании целесообразно провести на труднообогатимых и забалансовых рудах Кызыл-Таштыгского месторождения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В. А. Роль инновационных технологий обогащения и глубокой переработки минерального сырья в развитии минерально-сырьевой базы России / Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). – М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 3-6.

2. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. С. 125–135.

3. Салчак А.К., Ростовцев В.И. Интенсификация рудоподготовки и обогащения полиметаллических руд путем сочетания рентгенометрической сепарации и флотации / Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). – М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 225-229.
4. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава / Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – С. 3–4.
5. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А. Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Горный журнал. – 2020. – № 5. С. 39-46.
6. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. С. 107–128.
7. Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Брызгин А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН / Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – № 6. – С. 672-685.
8. Безуглов В. В., Брызгин А. А., Власов А. Ю., Воронин Л. А., Коробейников М.В. и др. Радиационные технологии и оборудование / Вопросы атомной науки и техники. Техническая физика и автоматизация. – М.: АО «НИИТФА», 2018. – Вып. 83. – С. 4-21.
9. Скопов С.В. Обогащение минерального сырья и техногенных отходов на ЗАО НПК «ТЕХНОГЕН» – Материалы III Международной научно-технической конференции «Рентгенометрическая сепарация минерального сырья и техногенных отходов», г. Екатеринбург – 2007. – С. 22-32.
10. Цыпин Е.Ф., Ефремова Т.А., Елизаров Д.Б., Овчинникова Т.Ю. Связь показателей рентгенометрической сепарации с крупностью сортируемых классов / Известия вузов. Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 77-84.
11. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11.
12. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б. Кластер информационных методов обогащения полезных ископаемых // ГИАБ. 2017. Спец. вып. № 23. С. 483–492.
13. Технологический регламент на технологию обогащения полиметаллических руд Кызыл-Таштыгского месторождения. – Красноярск – 2011. – 114 с.
14. Федоров Ю. О., Кацер И. У., Коренев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
15. Федоров Ю. О., Цой В. П. и др. Рудосортировочные комплексы – эффективное средство для реализации технологии предварительного обогащения бедных забалансовых руд. В кн. Состояние и развитие открытой добычи полезных ископаемых в рыночной экономике / Сборник докладов Международной конференции – Болгария: Варна. – 1998. – С. 306-314.

© А. К. Салчак, В. И. Ростовцев, 2024