

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ РУД «ДВОЙНОЙ УПОРНОСТИ»

З.Я. Чжо<sup>1</sup>, З.У. Хтет<sup>1</sup>, Ч.Ч. Пье<sup>1</sup>, З.Ч. Вай<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kancela@misis.ru

**Аннотация:** Конкретизированы цели устойчивого развития горнодобывающего предприятия. К данным целям отнесен комплекс мер, связанных с уменьшением техногенных образований, с одновременным повышением коэффициента извлечения ценного компонента из руд и вовлечением в отработку руд, ранее считавшихся забалансовыми. Обоснована необходимость и продемонстрированы причины отработки месторождений руд сложного вещественного состава. К данной категории руд относятся золотосульфидные руды, имеющие в своем составе сорбционное активное рассеянное углеродное вещество, так называемые руды «двойной упорности». Определены недостатки переработки золотосульфидных руд «двойной упорности». Поставлена задача снижения негативного влияния органического углерода, обеспечивающая высокие технико-экономические показатели передела добываемых руд сложного вещественного состава. Металлургический передел золотосульфидных руд «двойной упорности» осложнен наличием в них органического углерода. Внедрение высокоэффективной технологии обогащения позволит значительно снизить затраты и улучшить качество последующего металлургического передела. Определена специфика обогащения углеродосодержащих золотосульфидных руд, способствующая обеспечению высоких технико-экономических показателей переработки данного вида сырья. Предложена инновационная технология снижения углеродной составляющей в золотосульфидных рудах. Рекомендовано удаление тонкоизмельченного нерастворимого осадка с последующей углеродной флотацией во флотационных установках колонного типа. Определены потери золота от извлечения органического углерода для различных типов флотационных установок и тонины помола.

**Ключевые слова:** золото, депрессор, нерастворимый осадок, обогащение, органический углерод, селекция, упорные руды, углеродная флотация.

**Для цитирования:** Чжо З. Я., Хтет З. У., Пье Ч. Ч., Вай З. Ч. Оптимизация технологической схемы обогащения золотосульфидных руд «двойной упорности» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 143–155. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_143.

### Optimization of processing flow charts for double refractory sulfide gold ore

Z.Y. Kyaw<sup>1</sup>, Z.O. Htet<sup>1</sup>, K.K. Phye<sup>1</sup>, Z.K. Wai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: kancela@misis.ru

**Abstract:** Sustainable development objectives of a mining company are specified. These objectives include a package of actions aimed to reduce manmade waste, to increase recoverability of useful components and to extract ore previously assumed to be low grade. The necessity

and reasons for mining ore having complex material constitution are substantiated and demonstrated. Such ore types include sulfide gold ore the composition of which includes an active disseminated carbon matter having sorption capacity—the so-called double refractory ore. The shortages of the double refractory sulfide gold ore processing are identified. The task is to reduce the impact of the organic carbon in order to enhance processing efficiency of complex material constitution ore. The organic carbon complicates metallurgical conversion of double refractory sulfide gold ore. Introduction of a high-performance processing technology can essentially reduce the process cost and improve the metallurgical conversion quality. The specific character of the carbon-bearing sulfide gold ore processing is determined to ensure high efficiency of treatment of such raw material. An innovative technology of the carbon matter reduction in sulfide gold ore is proposed. It is recommended to remove fine insoluble precipitate and to carry out subsequent carbon flotation in flotation columns. The loss of gold in removal of organic carbon is determined for different-type flotation machines and for different fineness of grind.

**Key words:** gold, depressor, insoluble precipitate, processing, organic carbon, selection, refractory ore, carbon flotation.

**For citation:** Kyaw Z. Y., Htet Z. O., Phyo K. K., Wai Z. K. Optimization of processing flow charts for double refractory sulfide gold ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):143-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_143.

---

## Введение

Рост потребления природных ресурсов вызывает интенсификацию освоения месторождений полезных ископаемых [1], что приводит к уменьшению минерально-сырьевой базы [2]. По причине истощения запасов горнодобывающие предприятия осуществляют отработку месторождений с низким содержанием полезного компонента [3]; с рудами сложного вещественного состава [4]; с рудами, находящимися в сложных горно-геологических условиях или вблизи охраняемых объектов [5, 6]. Истощение запасов сопряжено с увеличением нагрузки на природную среду в регионах с высокой концентрацией горнодобывающей промышленности [7, 8]. Сложившаяся ситуация требует одновременного решения следующих вопросов: уменьшения техногенных образований; повышения коэффициента извлечения ценного компонента, что позволит обеспечить устойчивое развитие горнодобывающей

отрасли [9, 10]. Переход к устойчивому и интенсивному развитию экономики является приоритетной задачей, которую возможно решить путем снижения потерь природных ресурсов при минимальной величине общей экологической нагрузки на окружающую среду [11]. Вопросам снижения экологической нагрузки на окружающую среду посвящено множество работ [12, 13].

Для увеличения минерально-сырьевой базы перспективным вариантом является отработка месторождений сложного вещественного состава [14, 15], к ним относятся золотосульфидные месторождения черносланцевого и карлинского типов. С целью уменьшения образования техногенных отходов и снижения нагрузки на окружающую среду необходимо разработать и внедрить технологию полного цикла переработки руд данного типа. При разработке технологии переработки вкрапленных в сульфидные минералы руд необходимо

учитывать, что обогащение таких руд осложнено наличием в них активного сорбционно-рассеянного углеродного вещества (РУВ). Доля общемировых запасов золотосульфидных руд сложного вещественного состава находится в пределах 20% от мировых запасов золота.

Ряд исследований посвящено разработке и внедрению инновационных технологий по переработке руд «двойной упорности» [16, 17], позволяющих исключить негативное влияние сульфидов и РУВ. При этом необходимо отметить, что выбор и внедрение инновационной технологии обогатительного передела руд данного типа значительно снизит негативное влияние сульфидов и [18]. Инновационная технология обогащения позволит существенно улучшить эколого-экономический эффект процесса переработки золотосульфидных руд «двойной упорности», содержащих РУВ [19]. При разработке концепции комплексной переработки руд сложного вещественного состава необходимо учесть ярко выраженную специфику таких руд [20]. Выбор процесса обогащения руд сложного вещественного состава без наличия в нем сорбционно-рассеянного углеродного вещества представляется стандартной задачей [21] и сводится к применению классического способа сульфидной флотации или к сочетанию ее с гравитационной переработкой [22]. Высокое содержание активного сорбционно-рассеянного углеродного вещества (до 1,5–3,5%) ограничивает и осложняет выбор эффективно-инновационной схемы обогащения [15, 19, 21, 22].

При измельчении РУВ образуется тонко измельченное сырье с нерастворимым осадком, который в дальнейшем отрицательно влияет на технологические, технические и эксплуатационные показатели работы флотационной установки [23]. Наличие нерастворимого осадка приводит к ухудшению селективного

процесса и увеличению расходов на реагенты. Это вызывает загрязнение концентрата углеродистыми включениями, доля которых зачастую достигает 10%. Концентрат, полученный при обогатительной переработке золотосульфидных руд «двойной упорности», имеет в своем вещественном составе компоненты, оказывающие отрицательное влияние на технологические, технические и эксплуатационные параметры гидрометаллургического передела.

Рассмотрим простое эмпирическое соотношение  $Au/Сорг$  (отношение содержания золота в обогащаемом материале, г/т, к содержанию углеродистой составляющей РУВ, кг/т). Ранее проведенными исследованиями было установлено, что увеличение эффективности обогащения достигается применением метода автоклавного окисления с последующим сорбционным цианированием (РОХ–СІL). При исследовании процесса обогащения (соотношение  $Au/Сорг$  более 10 г/кг) золотосульфидных руд месторождения «Мурунтау» (Узбекистан) извлечение ценного компонента с применением технологии РОХ–СІL, описанной в [20], превысило 90%. Уменьшение  $Au/Сорг$  до 2,5 г/кг привело к снижению показателя извлечения до 75%, а уменьшение температуры в автоклаве на 10% снизило выход ценного компонента до 55%. Изменение процесса обогащения золотосульфидных руд «двойной упорности» необходимо рассматривать как первоначальный этап оптимизации минерально-вещественного состава исходного сырья перед извлечением золота в процессе металлургического передела.

Основопологающей задачей при внедрении инновационной технологии обогащения руд, содержащих в своем составе активные сорбционно-рассеянные углеродные вещества, является снижение их доли в концентрате с сохранением

ем (по возможности повышением) содержания ценного металла в нем.

При определении технико-экономических показателей процесса обогащения и выхода концентрата оптимального состава учитывают следующие критерии:

- стоимость обогащения золотосульфидных руд сложного состава;
- влияние минерально-вещественного состава на себестоимость обогащения;
- влияние минерально-вещественного состава на себестоимость и показатели металлургического передела.

Необходимо учитывать, что выбор и внедрение инновационной технологии обогащения золотосульфидных руд сложного состава следует рассматривать как повторяющийся процесс. Это связано с тем, что после металлургического передела и расчета экономических показателей может возникнуть необходимость корректировки исходных данных, с целью поиска технологии, имеющей максимальную доходность.

Процесс повышения эффективности обогащения золотосульфидных руд сложного состава сводится к выбору между общими схемами обогащения: гравитационно-флотационной или флотационной с одновременным инкорпорированием дополнительных технологических процессов, обеспечивающих снижение углеродной составляющей и диверсификацию товарной продукции.

### **Снижение углеродной составляющей**

Наиболее перспективной схемой снижения РУВ в товарном концентрате обогащения является поэтапный процесс ступенчатого снижения процентного содержания РУВ. Данная концепция реализуется путем пошагового снижения углеродной составляющей в концентрате и применением высокоэффективных депрессоров РУВ на последнем этапе.

Рекомендованные мероприятия снижают во флотационном конечном продукте (концентрате) процент органического углерода в несколько раз и способствуют улучшению других технологических показателей.

Перед отдельным самостоятельным вопросом снижения углеродной составляющей при обогащении золотосульфидных руд сложного состава стоит задача уменьшения органического углерода до нулевого уровня и формирование его в отвальный продукт при минимизации потерь ценного компонента.

Оптимальное соотношение снижения органического углерода до нулевого уровня и минимизации потерь ценного компонента для различных золотосульфидных руд зависит от их вещественно-минералогических особенностей и выявляется экспериментальным путем. Для определенного вещественно-минералогического состава золотосульфидных руд включение в технологическую цепочку при обогащении процесса снижения содержания органического углерода в концентрате может оказать негативное влияние. Это связано с тем, что потери ценного компонента в отвальном углеродном продукте превышают эффект от повышения качества концентрата, или увеличение ценного компонента в концентрате приводит к ухудшению его качества.

Процессами поэтапного снижения углеродной составляющей в концентрате перед сульфидной флотацией золотосульфидных руд сложного состава являются: удаление тонкоизмельченного нерастворимого осадка; углеродная флотация; последовательное применение данных процессов.

### **Удаление тонкоизмельченного нерастворимого осадка**

В процессе измельчения золотосульфидных руд сложного состава образу-

ются тонкоизмельченные нерастворимые фракции. Даже при измельчении в мельницах грубого помола органические углеродные составляющие образуют нерастворимый осадок, распределяющийся в шламовых классах различной крупности.

Исследования, проведенные на рудах сложного вещественного состава различных месторождений, позволяют утверждать, что увеличение мелкодисперсной фракции до 40% вызывает увеличение доли органического углерода до 30%. Если класс  $-0,071+0$  мм в дробленой руде доведен до 80%, то доля органического углерода в мелкодисперсной фракции превышает 60%.

При наличии большого процента РУВ тонкоизмельченного нерастворимого осадка в мелкодисперсных фракциях возникает необходимость его удаления в гидроциклонах. Доведение класса  $-0,071+0$  мм в дробленой руде до 80%, удаление нерастворимого осадка по классу 10 мкм позволяет переместить в хвосты примерно 40% органического углерода. При этом необходимо понять уровень потерь ценного компонента, отправленного в хвосты в данном нерастворимом осадке.

При дроблении золотосодержащих сульфидных руд, таких как арсеницит, образуется большое количество тонкодисперсной нерастворимой фракции, содержащей ценный металл. Следовательно, при применении гидроциклона ценный компонент, находящийся в тонкодисперсных фракциях, будет отправлен в хвосты, что значительно увеличит потери золота. В связи с высокими рисками увеличения потерь ценного компонента на месторождениях «Мурунтау» и «Маломыр» исключили возможность удаления тонкоизмельченного нерастворимого осадка. При этом необходимо достаточно консервативно подходить к применению технологии удаления не-

растворимого осадка при обогащении ценных руд, оценивать возможные риски увеличения потерь ценного компонента, даже если потери его можно считать приемлемыми. Процесс удаления тонкоизмельченного нерастворимого осадка трудно прогнозируем, плохо поддается контролю и управлению.

Ввиду того, что вещественно-минералогический состав руды, ее технологические свойства зачастую бывают весьма изменчивы в пределах определенного участка одного месторождения, то ожидать устойчивых и постоянных показателей в процессе удаления тонкоизмельченного нерастворимого осадка в течение эксплуатации месторождения невозможно.

### **Углеродная флотация**

Мировой опыт, основанный на результатах длительных технико-технологических исследований, позволил внедрить в технологический процесс обогащения золотосульфидных руд сложного состава предварительную углеродную флотацию. Так, при обогащении золотосульфидных руд месторождения «Мурунтау» при допустимых потерях ценного компонента до 2% была применена дополнительная углеродная флотация. При удалении органического углерода до 40% посредством предварительной флотации потери ценного компонента оставались на уровне допустимых норм.

Экспериментально на золотосульфидных рудах месторождения «Мурунтау» установлено, что использование депрессоров активного сорбционно-рассеянного углеродного вещества в сочетании с предварительной углеродной флотацией снижает долю органического углерода в концентрате в 3 раза.

Необходимо принимать во внимание, что эффективность применения предварительной углеродной флотации для руд «двойной упорности» различных

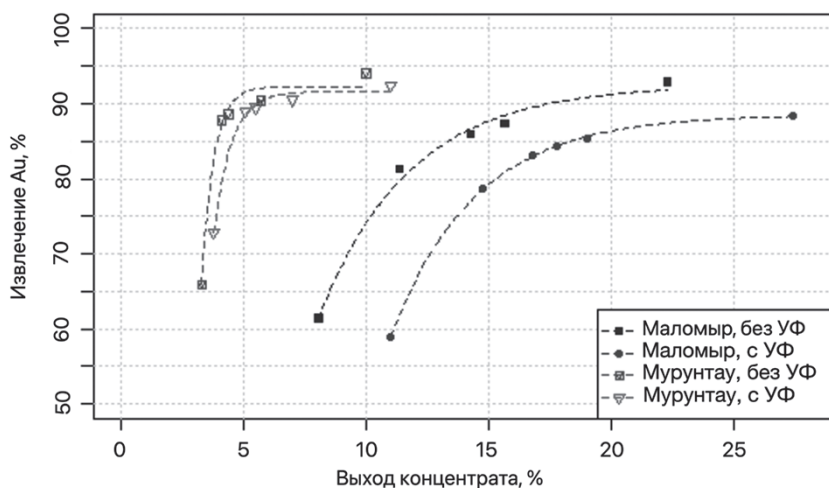


Рис. 1. Извлечение ценного компонента из золотосульфидных руд месторождений «Маломыр» и «Мурунтау»

Fig. 1. Recovery of valuable component from sulfide gold ore of Malomyr and Muruntau deposits

месторождений имеет разнонаправленный вектор. Так, при обогащении руд месторождения «Маломыр» с использованием дополнительной углеродной флотации резко увеличились потери ценного компонента (рис. 1).

Основной причиной увеличения потерь ценного компонента при внедрении предварительной углеродной флотации является невысокая избирательность обогащения тонкоизмельченного нерастворимого осадка классов крупности ниже средней для типов руд данного месторождения. Экспериментально установлено, что именно с тонкоизмельченным нерастворимым осадком связаны ценные компоненты, отправляемые в отвалы совместно с удалением углеродной составляющей [18].

Попытка увеличить избирательность процесса углеродного обогащения посредством подбора реагентов и изменения флотационного режима (ПМ-2, Т-92, МИБК, сосновое масло, и др.) не увенчалась успехом, а в некоторых случаях показала увеличение потерь ценного компонента. Различные вспениватели не могут положительно повлиять на

избирательность углеродно-флотационного обогащения тонкоизмельченного нерастворимого осадка, а только ограничивают время удержания механически вынесенных переизмельченных сульфидов и тонкодисперсных органических углеродов в пенном продукте.

Вектором, направленным на увеличение показателей предварительного углеродно-флотационного передела, является внедрение в технологическую цепочку современного инновационного флотационного оборудования, способствующего извлечению ультратонких дисперсных фракций. Предварительный подбор тонины помола перед предварительным углеродно-флотационным процессом значительно улучшает технико-экономические показатели.

С развитием технологий переработки добываемых ресурсов на смену традиционному флотационному обогащению минерального сырья приходят инновационные методы. Внедряются флотационные установки, обладающие новыми конструктивными особенностями: пневматические флотационные машины и флотационные установки колонного ти-

па. К последним относятся: Jameson Cell; Pneumotlot; Imhoflot G-Cell. Эффективность применения флотационных установок колонного типа исследовалась в работах [14, 15, 19, 21].

Имеется ряд примеров положительного опыта применения флотомашин колонного типа Jameson Cell на производственной линии компании Glencore Technology при осуществлении предварительной углеродно-флотационной подготовки в процессе обогащения золотосульфидных руд сложного состава месторождений «Red-Dog» (США), «Mount Isa» и «Century» (Австралия).

На золотосульфидных рудах сложного состава месторождения «Мурунтау» проведены экспериментальные исследования и выявлены зависимости показателей углеродно-флотационного передела для разного типа флотационных установок и крупности помола (рис. 2).

Улучшение показателей углеродной флотации (крупность измельчения класса  $-0,071$  мм 80%, обработка концентрата во флотационной установке Jameson Cell) наблюдается при извлечении органического углерода от 35%, потери ценного компонента составляют менее

1,25%. Это связано с достаточно высокой эффективностью переработки мелкофракционных составляющих материала флотационной установкой Jameson Cell благодаря ее технико-конструкционным характеристикам.

При этом необходимо отметить, что при тонине помола 40% класса  $-0,071$  мм результаты углеродно-флотационного передела, проведенного в лабораторных условиях на механической флотационной установке, сопоставимы с показателями, полученными при углеродно-флотационном переделе на установке колонного типа Jameson Cell.

Улучшение качественно-количественных показателей углеродно-флотационного передела рудного материала более грубого помола на механических флотационных установках объясняется снижением доли тонкоизмельченного нерастворимого осадка золотосодержащих сульфидов в ходе углеродно-флотационной переработки. При этом автоматически снижается количество сульфидов, прикрепляемых к пене и выносимых с ней в отвальный продукт.

Ранее указывалось, что реализация технологии снижения содержания орга-

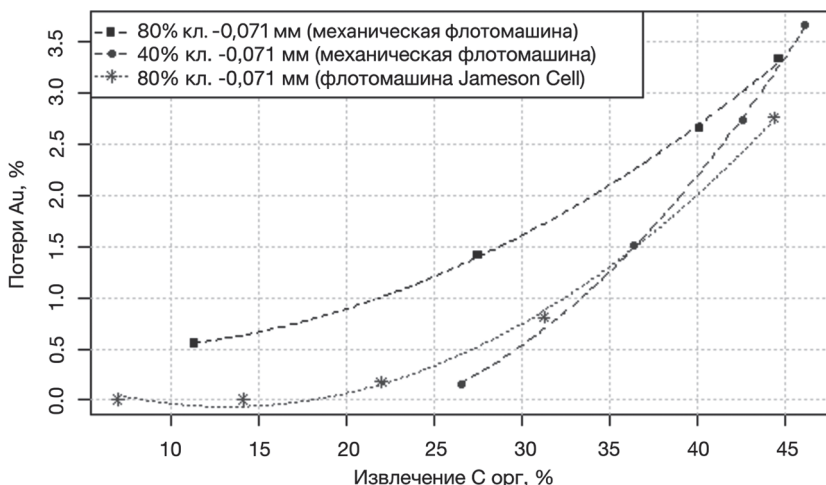


Рис. 2. Эффективность различных установок колонного типа (руды месторождения «Мурунтау») Fig. 2. Efficiency of different flotation columns (Muruntau ore)

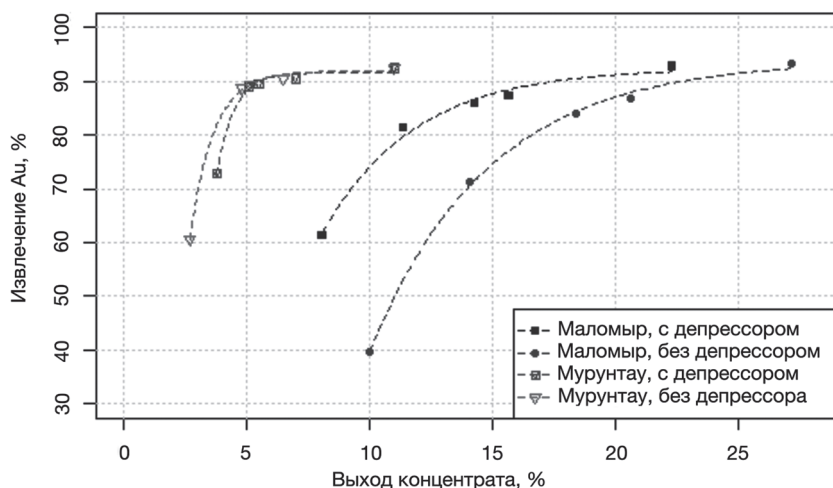


Рис. 3. Влияние депрессора на показатели извлечения для руд месторождений «Мурунтау» и «Маломыр»  
 Fig. 3. Effect of depressor on recovery efficiency for Muruntau and Malomyr ore

нического углерода как отдельного процесса не всегда возможна. При этом применение в технологическом процессе сульфидно-флотационного передела селективных депрессоров РУВ способствует улучшению технологических показателей обогащения. В лабораторных исследованиях были протестированы различные химические депрессоры: технические лигносульфонаты, декстрин, водорастворимый нигрозин, различные реагенты зарубежных производителей (Clariant, BASF, Solvay).

Установлено влияние депрессоров на количественно-качественные показатели извлечения (рис. 3). Как показали результаты экспериментов, применение депрессора для руд месторождения «Мурунтау» не дало значительного эффекта.

При обогащении руд месторождения «Маломыр» применение депрессора улучшило качество флотационного концентрата, что проявилось в повышении отношения «извлечение ценного компонента/выход концентрата» при одновременном снижении выхода золото-сульфидного остатка и сохранении степени извлечения из него ценного компонента.

### Товарное разнообразие продуктов и его расширение

Эффективность описанных выше методов снижения углеродной составляющей в выходном концентрате не для всех типов руд одинакова. Она может варьироваться даже в пределах одного выемочного участка. Зачастую в достаточно противоречивых и непростых случаях, при весьма высоком первоначальном содержании органического углерода в руде возможность получения золото-сульфидного концентрата, пригодного для дальнейшей обработки с применением стандартных гидрометаллургических технологий отсутствует.

С учетом специфики российских экологических требований извлечение ценного компонента из золото-сульфидного концентрата с невысоким отношением Au/Сорг предполагает более строгий контроль технологической цепочки с целью управления качеством образующихся отходов. Разработка и внедрение инновационных технологий переработки руд сложного вещественного состава на первоначальном этапе снижают инвестиционную привлекательность ввиду увеличения капитальных затрат и роста



эксплуатационных расходов. Разделение продукта обогащения руд «двойной упорности» на два класса — концентраты с низким содержанием органического углерода (КНСУ) и концентраты с высоким содержанием органического углерода (КВСУ) — позволит повысить инвестиционный интерес.

Золотосульфидные концентраты с низким содержанием органического углерода отвечают требованиям для передела гидрометаллургическим способом с применением типовых технологических схем. Производство данного типа концентрата позволит получить экономический эффект в краткосрочной перспективе, то есть с момента диверсификации.

Золотосульфидные концентраты с высоким содержанием органического углерода требуют применения более сложных технико-технологических решений. На первоначальном этапе для уменьшения капитальных расходов концентраты с высоким содержанием органического углерода необходимо рассматривать как готовый продукт. Но в долгосрочной перспективе реализация низкосортного концентрата не может считаться приемлемой, так как прибыль от реализации металла выше, нежели от реализации концентрата низкого качества. Поэтому прибыль, получаемую от реализации золотосульфидного концентрата с высоким содержанием органического углерода, необходимо инвестировать в создание инновационного высокотехнологичного процесса переработки концентратов низкого качества.

Включение в технологическую цепочку обогащения золотосульфидных руд сложных избирательно-селективных операций на основе гравитационных или флотационных методов позволит наладить производство концентратов разного типа.

Селекционный процесс гравитационной технологии основан на разнице

объемного веса (плотности) золотосульфидных руд. Разница в плотности приводит к тому, что арсенопирит при гравитационном переделе переходит в товарный продукт — золотосодержащий концентрат, а большая часть пирита оседает в хвостах обогащения, перемешиваясь с органическим углеродом и тонкоизмельченными нерастворимыми сульфидами. Применение гравитационного метода в технологической цепочке обогащения позволяет повысить отношение «извлечение ценного компонента/ выход углеродного концентрата» более чем в 10 раз. Внедрение избирательно-селективной технологии возможно как на первоначальном этапе подготовки исходной руды, так и на всех последующих этапах, вплоть до конечного продукта обогащения. Этап применения селективной технологии зависит от особенностей и вещественно-минералогического состава исходной руды.

Применение селективной технологии на этапе обогащения создает более гибкую технологическую цепочку, так как промежуточную и конечную продукцию можно использовать в зависимости от сложившейся ситуации.

## **Выводы**

1. При переработке золотосульфидных руд сложного состава обогащение необходимо рассматривать как процесс оптимизации вещественно-минералогического состава исходного материала перед извлечением ценного компонента посредством металлургического передела.

2. Снижение углеродной составляющей производят на начальном этапе подготовки золотосульфидного материала. Наиболее эффективным является поэтапно-ступенчатый метод, включающий удаление тонкоизмельченного нерастворимого осадка с последующей углеродной флотацией или без нее, и с

применением в дальнейшем высокоэффективных депрессоров органического углерода. При невозможности снижения углеродной составляющей внедрением отдельного технологического процесса использование избирательного депрессора при проведении сульфидно-флотационного передела позволяет значительно улучшить качественно-количественные показатели обогащения.

3. Существует вероятность возникновения неординарной ситуации, когда невозможно произвести золотосульфидный концентрат, удовлетворяющий кондиционным требованиям по содержанию органического углерода. В данном

случае необходимо диверсифицировать товарную продукцию, что в аспекте переработки руд «двойной упорности» позволяет создать конечный продукт двух различных типов: золотосульфидных концентратов с низкой и высокой долей органического углерода. Различие типов золотосульфидных концентратов предопределяет дифференциальный подход к разработке технологических схем их передела. Применение нестандартных флотационных или гравитационных технологий на различных этапах переработки позволяет реализовать селективный подход переработки золотосульфидных руд сложного состава.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavolová H., Čulková K., Šimková Z., Seňová A., Kudelas D. Contribution of mining industry in chosen EU countries to the sustainability issues // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 7, article 4177. DOI: 10.3390/su14074177.

2. Tomazinakis S., Valakas G., Gaki A., Damigos D., Adam K. The importance and challenges of sustainable development for the raw materials sector: the views of key stakeholders in three ESEE countries // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 7, article 3933. DOI: 10.3390/su14073933.

3. Mambwe P., Shengo M., Kidyanyama T., Muchez P., Chabu M. Geometallurgy of cobalt black ores in the katanga copperbelt (ruashi Cu-Co deposit): a new proposal for enhancing cobalt recovery // Minerals. 2022, vol. 12, no. 3, article 295. DOI: 10.3390/min12030295.

4. Vinnikov V. A., Silberschmidt M. G., Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Gzogyan T. N. Environmental resource – Economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition // Environment, Technology, Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2013, vol. 1, pp. 209 – 215. DOI: 10.17770/etr2013vol1.837.

5. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабырь Н. В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

6. Адигамова А. Э., Юденков А. В. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 93–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_93.

7. Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Хайрутдинов А., Тюляева Ю. С. Повышение безопасности при извлечении водорастворимых руд путем оптимизации параметров закладочного массива // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 53–59. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-53-59.

8. Earl C., Hussain I. H., Cook S., Cheeseman C. R. Environmental sustainability and supply resilience of cobalt // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 7, article 4124. DOI: 10.3390/su14074124.

9. Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khairutdinov A., Kowalik T. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction // IOP Con-

ference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 869, no. 3, article 032004. DOI: DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004.

10. Голик В., Дмитрак Ю., Габараев О., Кожиев Х. Минимизация влияния горного производства на окружающую среду // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 6. — С. 26–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.

11. Kongar-Syuryun Ch., Ivannikov A., Khayrutdinov A., Tyulyaeva Y. Geotechnology using composite materials from man-made waste is a paradigm of sustainable development // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 38, pp. 2078–2082. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.145.

12. Long H., Liu H., Li X., Chen L. An Evolutionary game theory study for construction and demolition waste recycling considering green development performance under the chinese government's reward – penalty mechanism // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, vol. 17, article 6303. DOI:10.3390/ijerph17176303.

13. Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A. The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012007.

14. Estay H., Barros L., Troncoso E. Metal sulfide precipitation: recent breakthroughs and future outlooks // Minerals. 2021, vol. 11, no. 12, article 1385. DOI: 10.3390/min11121385.

15. Александрова Т. Н., Панова Е. Г. Технологические аспекты извлечения благородных и редких металлов из углеродсодержащих пород // Записки Горного института. — 2016. — Т. 217. — С. 72–79.

16. Меритуков М. А. Золото и природное углеродистое вещество. — М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2007. — 112 с.

17. Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Т. 1. — Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. — 342 с.


18. Saramak D., Saramak A. Potential benefits in copper sulphides liberation through application of hrc device in ore comminution circuits // Minerals. 2020, vol. 10, no. 9, article 817. DOI: 10.3390/min10090817.

19. Александрова Т. Н., Ромашев А. О., Семенихин Д. Н. Минералого-технологические аспекты и перспективные методы интенсификации обогащения сульфидной золотосодержащей руды // Металлург. — 2015. — № 4. — С. 53–59.

20. Bare G. T., Mbayo J. J. K., Ndlovu S., Shemi A., Chipise L. Mineralogical characterization and acid pretreatment of a gold calcine leach residue // Minerals. 2022, vol. 12, no. 1, pp. 10. DOI: 10.3390/min12010010.

21. Smith T., Lin D., Lacouture B., Anderson G. Removal of organic carbon with a Jameson Cell at Red Dog Mine / Proceedings of the 40th Annual Canadian Mineral Processors Conference. 2008, pp. 333–347.

22. Александрова Т. Н., Цыплаков В. Н., Ромашев А. О., Семенихин Д. Н. Удаление сорбционно-активных углеродистых веществ из упорных золотосульфидных руд и концентратов месторождения Майское // Обогащение руд. — 2015. — Т. 4. — С. 3–7. DOI: 10.17580/or.2015.04.01.

23. Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 38, pp. 2059–2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141. 

## REFERENCES

1. Pavolová H., Čilková K., Šimková Z., Seňová A., Kudelas D. Contribution of mining industry in chosen EU countries to the sustainability issues. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 7, article 4177. DOI: 10.3390/su14074177.

2. Tomazakis S., Valakas G., Gaki A., Damigos D., Adam K. The importance and challenges of sustainable development for the raw materials sector: the views of key stakeholders in three ESEE countries. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 7, article 3933. DOI: 10.3390/su14073933.

3. Mambwe P., Shengo M., Kidyanyama T., Muchez P., Chabu M. Geometallurgy of cobalt black ores in the katanga copperbelt (ruashi Cu-Co deposit): a new proposal for enhancing cobalt recovery. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 3, article 295. DOI: 10.3390/min12030295.

4. Vinnikov V. A., Silberschmidt M. G., Bocharov V. A., Ignatkin V. A., Gzogyan T. N. Environmental resource – Economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition. *Environment, Technology, Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2013, vol. 1, pp. 209 – 215. DOI: 10.17770/etr2013vol1.837.

5. Rybak J., Khayrutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun Ch. B., Babyr N. V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61 – 70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

6. Adigamov A. E., Yudenkov A. V. Stress-strain behavior model of disturbed rock mass with regard to anisotropy and discontinuities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 93 – 103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_93.

7. Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch. B., Khayrutdinov A. M., Tyulyaeva Yu. S. Improving safety when extracting water-soluble ores by optimizing the parameters of the backfill mass. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 1, pp. 53 – 59. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-53-59.

8. Earl C., Hussain I. H., Cook S., Cheeseman C. R. Environmental sustainability and supply resilience of cobalt. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 7, article 4124. DOI: 10.3390/su14074124.

9. Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khairutdinov A., Kowalik T. Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 869, no. 3, article 032004. DOI: DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032004.

10. Golik V. I., Dmytrak Yu. V., Gabaraev O. Z., Kozhiev Kh. Minimizing the impact of mining on the environment. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 26 – 29. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.

11. Kongar-Syuryun Ch., Ivannikov A., Khayrutdinov A., Tyulyaeva Y. Geotechnology using composite materials from man-made waste is a paradigm of sustainable development. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 2078 – 2082. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.145.

12. Long H., Liu H., Li X., Chen L. An Evolutionary game theory study for construction and demolition waste recycling considering green development performance under the chinese government's reward – penalty mechanism. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, article 6303. DOI:10.3390/ijerph17176303.

13. Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A. The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012007.

14. Estay H., Barros L., Troncoso E. Metal sulfide precipitation: recent breakthroughs and future outlooks. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 12, article 1385. DOI: 10.3390/min11121385.

15. Alexandrova T. N., Panova E. G. Technological aspects of extraction of precious and rare metals from carbonaceous rocks. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 217, pp. 72 – 79. [In Russ].

16. Meritukov M. A. *Zoloto i prirodnoe uglerodistoe veshchestvo* [Gold and natural carbon substance], Moscow, Izdatel'skiy dom «Ruda i metally», 2007, 112 p.

17. Lodeyshchikov V. V. *Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud*, t. 1 [The technology of gold and silver recovery from refractory ores, vol. 1], Irkutsk, OAO «Irgired-met», 1999, 342 p.

18. Saramak D., Saramak A. Potential benefits in copper sulphides liberation through application of hrc device in ore comminution circuits. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 9, article 817. DOI: 10.3390/min10090817.

19. Aleksandrova T. N., Romashev A. O., Semehin D. N. Mineralogical-technological aspects and perspective methods of intensifying the benefici-ation of sulfide gold ore. *Metallurg*. 2015, no. 4, pp. 53 – 59. [In Russ].

20. Bare G. T., Mbayo J. J. K., Ndlovu S., Shemi A., Chipise L. Mineralogical characterization and acid pretreatment of a gold calcine leach residue. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 1, pp. 10. DOI: 10.3390/min12010010.

21. Smith T., Lin D., Lacouture B., Anderson G. Removal of organic carbon with a Jameson Cell at Red Dog Mine. *Proceedings of the 40th Annual Canadian Mineral Processors Conference*. 2008, pp. 333 – 347.

22. Aleksandrova T. N., Tsiplakov V. N., Romashev A. O., Semenikhin D. N. Removal of sorption-active carboniferous components from difficultly-treated gold sulfide ores and concentrates of the Mayskoye deposit. *Obogashchenie Rud*. 2015, vol. 4, pp. 3–7. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2015.04.01.

23. Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 2059 – 2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чжо Зай Яа<sup>1</sup> – канд. техн. наук, докторант,

e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,

Хтет Зо У<sup>1</sup> – аспирант,

e-mail: htetzawoo68099@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-2040-2552,

Пье Чжо Чжо<sup>1</sup> – аспирант,

e-mail: bophyo18319y93@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3084-6771,

Вай Зин Чжо<sup>1</sup> – аспирант,

e-mail: waizinkyaw.yo@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-1418-9644,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Чжо Зай Яа, e-mail: kokyawgyi49@gmail.com.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куяв Зай Яа<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Candidate,

e-mail: kokyawgyi49@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-4364-9574,

Хтет Зав Оо<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: htetzawoo68099@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-2040-2552

Пхуое Куяв Куяв<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: bophyo18319y93@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3084-6771,

Вай Зин Куяв<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: waizinkyaw.yo@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-1418-9644,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS»,

119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** Куяв Зай Яа, e-mail: kokyawgyi49@gmail.com.

Получена редакцией 16.05.2022; получена после рецензии 22.07.2022; принята к печати 10.08.2022.

Received by the editors 16.05.2022; received after the review 22.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.