УДК 622

Фатьянова Е.И.

студентка 1 курса

специальность «Добыча полезных ископаемых»

Школа горной инженерии и геологии

Университет Улытау

(г. Жезказган, Казахстан)

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ ДЛЯ МЕДНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОСТОЧНАЯ САРЫ-ОБА

Аннотация: *в статье рассмотрена возможность применения предварительной сепарации (предконцентрации) медных руд месторождения Восточная Сары-оба перед основной переработкой. В качестве технологического варианта анализируется рентгенофлуоресцентная кусковая сортировка, основанная на регистрации характеристического рентгеновского излучения отдельных кусков. Цель работы состоит в разработке расчетной схемы оценки технологической и экономической целесообразности такой операции. Использованы методы анализа опубликованных исследований, материального баланса, сценарного моделирования и укрупненной технико-экономической оценки. Экономическая оценка учитывает сокращение затрат на последующую переработку и транспортировку, капитальные и эксплуатационные затраты сепарационного комплекса, а также потери меди с удаляемой фракцией. Для расчёта экономического эффекта условно приняты следующие показатели: годовая добыча 1,0 млн т, содержание меди в исходной руде 0,70%, выход удаляемой фракции 20% и содержание меди в ней 0,10%. Расчёт показывает, что содержание меди в потоке, направляемом на фабрику, может составить 0,85% при сохранении 97,14% меди в полезном потоке. При заданных условных затратах расчётный годовой эффект достигает 352 млн тенге, простой срок окупаемости — около 5,1 года.*

Ключевые слова: *предконцентрация, рентгенофлуоресцентная сепарация, кусковая сортировка, медная руда, Восточная Сары-оба, рудоподготовка, экономическая целесообразность.*

Введение.

Рациональное использование минерально-сырьевой базы требует совершенствования не только операций извлечения полезных компонентов, но и подготовки руды к обогащению. Существенная доля энергетических и эксплуатационных затрат горно-обогатительного производства связана с транспортированием, дроблением, измельчением и переработкой всей массы добытого материала, включая пустые и слабоминерализованные породы. Одним из способов уменьшения этой нагрузки является предварительная сепарация, или предконцентрация, – разделение кускового материала до основных переделов с выделением фракции, содержание полезного компонента в которой ниже заданного технологического порога [3, 4].

Месторождение Восточная Сары-оба – это медное месторождение, входящее в состав Жиландинской группы месторождений, расположенное в Улытауской области Казахстана, примерно в 30–40 км к северу от города Сатпаев. Геологические и структурные особенности меднорудного района отражены в работе М. Б. Нурпеисовой и соавторов [2].

В качестве одного из вариантов предварительного разделения исследована рентгенофлуоресцентная (РФС) кусковая сортировка. После дробления и классификации куски подаются в измерительную зону, где регистрируется характеристическое рентгеновское излучение. На основании спектральных параметров и заданного алгоритма система относит материал к одному из потоков. Рентгенофлуоресцентная сортировка не извлекает металл химическим способом и не заменяет дробление, измельчение и обогащение, её задача – изменить массовое и качественное соотношение материала, поступающего на последующие операции [5, 6].

Цель исследования – разработать расчетно-аналитическое обоснование применения предварительной сепарации для руд месторождения Восточная Сары-оба и определить условия, при которых такой процесс может быть технологически и экономически целесообразным. Для достижения цели решаются следующие задачи: определить ключевые параметры, требующие

экспериментального изучения, построить условный материальный баланс, оценить изменение содержания меди и ее потери с удаляемой фракцией, выполнить укрупненный расчет годового экономического эффекта, провести сценарную проверку чувствительности результата к содержанию меди в отходящем потоке.

Рабочая гипотеза состоит в том, что предварительная сортировка может уменьшить массу руды, направляемой на основные переделы, при приемлемом сохранении меди в технологическом продукте. Проверка гипотезы для конкретного месторождения возможна только после лабораторных и опытно-промышленных испытаний. Все числовые значения, приведенные далее, являются условными параметрами расчетного сценария и не представляют фактические данные геологического опробования Восточной Сары-обы.

1. Материалы и методы исследования.

Исследование выполнено как расчетно-аналитическая работа на основе сведений о месторождении и регионе, представленных в исходных материалах [1, 2], а также опубликованных исследований по рудоподготовке, предконцентрации и рентгенофлуоресцентной сортировке [3–8]. Фактическая база лабораторных испытаний, результаты химического анализа отдельных кусков, паспортные данные выбранной промышленной установки и коммерческие предложения поставщиков оборудования в распоряжении автора не представлены. По этой причине вместо экспериментальных результатов использован иллюстративный числовой сценарий.

В базовом сценарии условная годовая подача руды принята равной 1,0 млн.т, среднее содержание меди в исходной руде – 0,70%. Предполагается, что сепаратор удаляет 20% исходной массы со средним содержанием меди 0,10%. Остальные 80% массы образуют продукт сепарации, направляемый на фабрику. Для сравнения вариантов условно принята одинаковая степень извлечения меди на последующих переделах – 90%.

Для расчёта используются следующие показатели: выход удаляемой фракции β, содержание меди в исходной руде α, среднее содержание меди в удаляемом потоке θ, содержание меди в продукте сепарации γ, извлечение меди в продукт сепарации εCu. При условии, что все величины содержания выражены в процентах, расчётное содержание меди в продукте сортировки определяется из баланса компонента:

$$\gamma = (\alpha - \beta \cdot \theta) / (1 - \beta).$$

Извлечение меди в продукт сепарации определяется как отношение количества меди в этом продукте к количеству меди в исходном питании:

$$\varepsilon Cu = [(\alpha - \beta \cdot \theta) / \alpha] \cdot 100\%.$$

Коэффициент повышения содержания меди рассчитывается как $K = \gamma / \alpha$.

Таблица 1. Условные исходные параметры расчётного сценария.

Параметры	**Обозначение**	**Значение**
Годовая добыча исходной руды	M_0	1 000 000 т/год
Содержание меди в исходной руде	α	0,70%
Выход удаляемой фракции	β	20,0% массы
Содержание меди в удаляемой фракции	θ	0,10%
Извлечение меди на последующих переделах	η	90,0%
Удельные затраты на переработку	Собр	6 500 тенге/т
Расстояние транспортировки к фабрике	L	35 км
Тариф транспортировки	Стр	4 тенге/(т·км)
Эксплуатационные затраты сепарационного узла	Ссеп	180 млн. тенге/год
Обращение с удаляемой породой	Суд	150 тенге/т

Параметры	Обозначение	Значение
Контроль качества и лабораторные работы	Сконтр	10 млн. тенге/год
Условная чистая стоимость 1 т извлекаемой меди	PCu	4,2 млн. тенге/т
Дополнительные капитальные вложения	Кдоп	1,8 млрд. тенге

1.1 Методика проверки технологической применимости.

Лабораторную программу целесообразно начинать с выделения основных рудных разновидностей и формирования представительных проб по зонам и типам минерализации. Для предварительного скрининга в качестве проектного объёма может быть предусмотрено не менее 600 кусков: по 200 кусков в трёх классах крупности 20–40, 40–70 и 70–100 мм. Такое количество является предлагаемым стартовым объёмом работ, а окончательный размер выборки следует определять по изменчивости содержания меди и требованиям к доверительной оценке. Каждую пробу необходимо маркировать, взвешивать, измерять на сепараторе и направлять на независимый химический анализ.

Для каждого класса крупности следует проверить несколько порогов разделения и повторяемость измерений. Спектральные параметры сопоставляют с фактическим содержанием меди, установленным химическим анализом. Затем определяют долю правильно распознанных кусков, выход продуктов, содержание меди в каждом продукте, извлечение меди в полезный поток и её потери с удаляемой фракцией. Особое внимание требуется уделить соотношению поверхностной и объёмной минерализации, поскольку РФС регистрирует сигнал от поверхности куска, а экономическое решение зависит от содержания компонента во всем объёме материала [6].

Если минералогический и химический анализ выявит несколько ценных компонентов, алгоритм сортировки должен учитывать их совместное распределение. Настройка только на медь способна привести к удалению кусков, содержащих другой промышленно значимый элемент. Для комплексных руд

выбор алгоритма должен опираться на ограничения по каждому ценному компоненту [7].

1.2 Экономическая модель.

Экономическая оценка сравнивает базовый вариант, при котором вся добытая руда поступает на фабрику, и вариант с предварительной сортировкой. Годовой эффект складывается из экономии затрат на переработку и транспортирование удаляемой массы за вычетом стоимости меди, теряемой с этим потоком, эксплуатационных расходов сепарационного комплекса, затрат на обращение с отсортированной породой и контроля качества:

$$Эгод = Мотс \cdot Собр + Мотс \cdot L \cdot Стр - VCu - Ссеп - Мотс \cdot Суд - Сконтр.$$

Стоимость теряемой меди в расчетной модели определяется по формуле

$$VCu = Мотс \cdot (\theta / 100) \cdot \eta \cdot PCu,$$

где:

Мотс – годовая масса удаляемой фракции, т,

η – условное извлечение меди на последующих переделах,

PCu – условная чистая денежная оценка одной тонны извлекаемой меди.

Удельные затраты на переработку Собр не включают транспортировку, поэтому транспортная экономия учитывается отдельной строкой. Если в фактической калькуляции транспорт уже включён в стоимость переработки, повторное включение транспортной составляющей недопустимо.

Простой срок окупаемости определяется как *Ток = Кдоп / Эгод* при положительном годовом эффекте. Дополнительно рассчитывается чистый дисконтированный доход за десять лет при условной ставке дисконтирования 12% и постоянном ежегодном денежном потоке. Укрупненная модель не

учитывает налоги, инфляцию, изменения цены меди, график освоения мощности, оборотный капитал, ликвидационную стоимость и возможные затраты на реконструкцию. Поэтому её результаты могут использоваться только для предварительного отбора сценариев.

2. Результаты. Расчетный материальный баланс.

При условном содержании меди в исходной руде 0,70% одна тысяча тонн питания содержит 7,0 т меди. При удалении 20% массы с содержанием меди 0,10% в отходящий поток переходит 200 т материала и 0,20 т меди. В продукте сепарации остается 800 т материала с 6,80 т меди. Таким образом, расчетное содержание меди в потоке, направляемом на фабрику, составляет 0,85%, а извлечение меди в этот поток – 97,14%. Коэффициент повышения содержания меди равен 1,21.

Таблица 2. Условный материальный баланс на 1 000 т исходной руды.

Показатель	Исходная руда	Продукт сепарации	Удаляемая фракция
Масса, т	1 000	800	200
Выход по массе, %	100,0	80,0	20,0
Содержание меди, %	0,70	0,85	0,10
Количество меди, т	7,00	6,80	0,20
Распределение меди, %	100,0	97,14	2,86

В пересчёте на условную годовую подачу 1,0 млн т на фабрику поступает 0,8 млн. т продукта сепарации. Масса материала, направляемого на последующие переделы, сокращается на 200 тыс. т в год. При неизменном условном извлечении 90% фабрика извлекает 6 120 т меди из потока после сепарации против 6 300 т в базовом варианте без сепарации. Разница составляет 180 т извлекаемой меди в год, именно эта величина использована при оценке упущенного денежного вклада меди.

2.1 Условная оценка годового экономического эффекта.

При принятых допущениях экономия на последующей переработке равна 1,30 млрд. тенге в год (200 тыс. т × 6 500 тенге/т). Экономия на транспортировании при расстоянии 35 км и тарифе 4 тенге/(т·км) составляет 28 млн. тенге. Условная стоимость 180 т извлекаемой меди, не поступившей на фабрику, равна 756 млн. тенге. Дополнительные эксплуатационные затраты сепарационного узла составляют 180 млн. тенге, обращение с удаляемой породой – 30 млн. тенге, лабораторный и качественный контроль – 10 млн. тенге.

Таблица 3. Условный годовой экономический эффект.

Статья расчёта	**Расчёт**	**Эффект, млн. тенге/год**
Экономия на переработке	200 000 т × 6 500 тенге/т	1 300
Экономия на транспортировании	200 000 т × 35 км × 4 тенге/(т·км)	28
Потеря денежного вклада извлекаемой меди	180 т × 4,2 млн. тенге/т	-756
Эксплуатация сепарационного узла	Условная годовая сумма	-180
Обращение с удаляемой породой	200 000 т × 150 тенге/т	-30
Лабораторный контроль	Условная годовая сумма	-10
Чистый годовой эффект	Сумма статей	352

При дополнительных капитальных вложениях 1,8 млрд. тенге простой срок окупаемости составит около 5,1 года. При условном горизонте оценки 10 лет и ставке дисконтирования 12% чистый дисконтированный доход составит приблизительно 189 млн. тенге, внутренняя норма доходности – около 14,5%. Расчет не включает налоги, инфляцию и изменение денежных потоков по годам, поэтому полученные финансовые показатели не являются инвестиционным заключением.

2.3 Чувствительность к содержанию меди в удаляемой фракции.

Наиболее критичным параметром для экономики является не только доля удаляемой массы, но и фактическое содержание меди в ней. При одинаковых капитальных и удельных эксплуатационных параметрах увеличение содержания меди в удаляемом потоке повышает потери компонента и уменьшает экономический эффект. Для оценки этой зависимости рассмотрены три условных сценария.

Таблица 4. Сценарная чувствительность расчётной модели.

Сценарий	Удаляемая масса, %	Cu в удаляемой фракции, %	Извлечение Cu в продукт, %	Эгод, млн. тенге/год
Консервативный	15	0,15	96,79	-67
Базовый	20	0,10	97,14	352
Оптимистичный	25	0,05	98,21	960

В базовом сценарии нулевой годовой эффект достигается при содержании меди в удаляемой фракции приблизительно 0,147% при сохранении остальных допущений. Следовательно, если среднее содержание меди в отходящем потоке окажется выше этого расчётного порога, рассматриваемый вариант в принятой экономической конфигурации теряет привлекательность. Порог 0,147% не является универсальным нормативом: он изменится при другой цене извлекаемой меди, стоимости переработки, транспортном плече, производительности, затратах сепарации и извлечении фабрики

$$\theta кр = [Мотс \cdot (Собр + L \cdot Стр - Суд) - Ссеп - Сконтр] \cdot 100 / [Мотс \cdot \eta \cdot PCu].$$

3. Обсуждение.

Полученное расчётное повышение содержания меди с 0,70 до 0,85% и сокращение массы питания фабрики на 20% иллюстрируют возможный эффект предконцентрации, но сами по себе не доказывают применимость РФС на Восточной Сары-обе. Положительный экономический результат в базовом сценарии обусловлен сочетанием относительно низкого содержания меди в удаляемой фракции, достаточно высокой стоимости переработки и умеренных затрат на сортировочный узел. При росте содержания меди в отходящем потоке до 0,15% модель дает отрицательный эффект, несмотря на снижение массы питания фабрики. Тем самым технологический критерий нельзя задавать только по максимальному проценту отсева: первостепенное значение имеет соотношение между удаляемой массой и потерями ценного компонента.

Эффективность предварительной сепарации зависит от контрастности руд, гранулометрического состава и выбранного метода сортировки [4, 5]. Для РФС существенное значение имеют экспериментальная сепарационная характеристика и неоднородность поверхностной минерализации [6]. При наличии нескольких полезных компонентов алгоритм следует оценивать по совокупным потерям, а не только по меди [7]. Экономические расчёты для иных объектов могут служить методической основой, однако не заменяют расчёта на данных конкретного месторождения [8].

Для перехода к лабораторной проверке рекомендуется сформировать выборки основных рудных типов и провести сортировку по нескольким классам крупности. Проектный диапазон 20–100 мм и выделение трёх классов 20–40, 40–70 и 70–100 мм предложены для организации первоначального исследования, но должны быть скорректированы по результатам дробимости, раскрытия минералов, технических ограничений аппарата и фактического распределения меди по классам. Требуется также установить влияние влажности, пылеватости, окисленности поверхности и загрязнения кусков на воспроизводимость показаний.

Рекомендуемая последовательность работ включает:

1. Минералогическое и химическое изучение проб.

2. Оценку распределения меди по классам крупности и отдельным кускам.

3. Калибровку аналитического сигнала сепаратора по результатам химического анализа.

4. Получение сепарационных характеристик при нескольких порогах.

5. Составление материальных балансов и проверку потерь меди.

6. Расчет затрат по фактическим коммерческим предложениям.

7. Опытно-промышленные испытания на потоке с фиксацией производительности, простоев, расхода электроэнергии, технического обслуживания и качества продукта.

По итогам следует сравнить не менее трёх вариантов настройки: с приоритетом минимизации потерь меди, с приоритетом сокращения массы и компромиссный вариант.

Экологическая и производственная безопасность должны оцениваться одновременно с технологическими параметрами. На участках дробления, грохочения и сортировки требуется предусмотреть пылеподавление и аспирацию, безопасное обслуживание измерительного оборудования и контроль состава удаляемой породы. До выбора способа размещения или дальнейшего использования отходящей фракции необходимо проверить ее химический и минералогический состав. Уменьшение потока на фабрику не означает автоматической экологической безопасности удаляемого материала, обращение с ним должно соответствовать требованиям экологического законодательства Республики Казахстан [9].

Выводы.

Предварительная сепарация может рассматриваться как один из возможных вариантов совершенствования рудоподготовки медных руд месторождения Восточная Сары-оба. Рентгенофлуоресцентная кусковая сортировка представляет интерес для экспериментальной проверки, поскольку позволяет принимать решение о разделении материала по измеряемым характеристикам отдельных кусков. Однако ее результативность будет определяться контрастностью минерализации, связью поверхностного сигнала с объемным содержанием меди, крупностью сортировки, влажностью и точностью распознавания.

В условном расчетном сценарии при годовой подаче 1,0 млн т, содержании меди в исходной руде 0,70%, удалении 20% массы с содержанием меди 0,10% и извлечении на последующих переделах 90% содержание меди в потоке на фабрику повышается до 0,85%, а сохранение меди в продукте сепарации составляет 97,14%. При принятых условных экономических параметрах чистый годовой эффект равен 352 млн. тенге, простой срок окупаемости – 5,1 года, расчетный ЧДД за 10 лет при ставке 12% – около 189 млн. тенге.

Сценарный анализ показывает, что экономическая целесообразность чувствительна к содержанию меди в удаляемой фракции: в базовой конфигурации расчетный порог безубыточности составляет около 0,147% Cu. Положительный результат может считаться обоснованным только при подтверждении материального баланса, допустимых потерь меди, производительности сепаратора и положительного денежного потока с учетом всех капитальных и эксплуатационных затрат.

Для принятия решения о внедрении необходимо выполнить минералого-химическую характеристику представительных проб, проверить связь рентгеноспектральных параметров с фактическим содержанием меди, подобрать классы крупности и пороги разделения, провести лабораторные и опытно-промышленные испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Протокол общественных слушаний посредством открытых собраний по проекту «План ликвидации последствий ведения горных работ по отработке запасов месторождения Восточная Сарыоба открытым способом» [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.gov.kz/uploads/2021/11/11/ffe368dc1376e20257431fc978951405_original.1097326.pdf (дата обращения: 23.10.2026)

2. Нурпеисова М.Б., Битимбаев М.Ж., Рысбеков К.Б., Дербисов К.Н., Турумбетов Т., Шульц Р. Геодезическое обоснование меднорудного района Сарыарки // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2020. Т. 6, № 444. С. 194–202. https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.147

3. Газалеева Г.И., Цыпин Е.Ф., Червяков С.А. Рудоподготовка: дробление, грохочение, обогащение: научная монография. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 914 с.

4. Терещенко С.В., Шибаева Д.Н. Повышение качественных показателей рудопотока с использованием методов предконцентрации: теория и практика // Горный журнал. 2020. № 9. С. 60–65. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.08

5. Цыпин Е.Ф., Овчинникова Т.Ю., Ефремова Т.А. Эффективность применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 431–442. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442

6. Цыпин Е.Ф., Овчинникова Т.Ю., Ефремова Т.А., Зиятдинов С.В. Получение экспериментальной сепарационной характеристики рентгенофлуоресцентного сепаратора для окисленной медной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12-1. С. 164–176. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_164

7. Цыпин Е.Ф., Ефремова Т.А., Овчинникова Т.Ю. Влияние алгоритма рентгенофлуоресцентной сепарации на эффективность предварительного обогащения медно-цинковой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 1-1. С. 208–220

8. Цыпин Е.Ф., Ефремова Т.А., Овчинникова Т.Ю. Экономическая эффективность предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 6. С. 66–74. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-66-74

9. Экологический кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК [Электронный ресурс]. Информационно-правовая система нормативных правовых актов

Республики Казахстан «Әділет». URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400 (дата обращения: 23.10.2026)

Fatyanova Ye.I.
student of 1st year
specialty «Mineral Extraction»
School of Mining Engineering and Geology
Ulytau University
(Zhezkazgan, Kazakhstan)

IMPLEMENTATION OF PRELIMINARY SEPARATION METHOD FOR COPPER ORES FROM EASTERN SARY-OBA DEPOSIT

Abstract: *this paper examines the potential for preliminary separation (preconcentration) of copper ores from the Eastern Sary-Oba deposit before further processing. X-ray fluorescence sorting of individual ore lumps is considered as a technological option, it relies on detecting characteristic X-ray emissions from each lump. The aim is to develop a calculation framework for assessing the technical and economic feasibility of this operation. The study uses analysis of published research, material balance calculations, scenario modeling, and a preliminary techno-economic assessment. The economic assessment accounts for savings in downstream processing and transportation costs, capital and operating costs of the separation facility, and copper losses in the rejected fraction. The following values are assumed for calculating the economic benefit: annual ore production of 1.0 million tonnes, copper grade of 0.70% in the feed ore, rejected fraction yield of 20%, and copper grade of 0.10% in that fraction. Calculations indicate that copper grade in the stream sent to the processing plant could reach 0.85%, with 97.14% of the copper retained in the product stream. Under the assumed cost parameters, the estimated annual economic benefit reaches 352 million tenge, with a simple payback period of approximately 5.1 years.*

Keywords: *preconcentration, X-ray fluorescence sorting, lump sorting, copper ore, Eastern Sary-Oba, ore preparation, economic feasibility.*