

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РУД

Е.Ф. Цыпин¹, Т.Ю. Овчинникова¹, Т.А. Ефремова²

¹ Уральский государственный горный университет,

² ОАО «Уралмеханобр»

Аннотация: Предварительная концентрация руд – один из эффективных путей совершенствования технологий обогащения. Из применяемых методов предконцентрации к перспективным относится рентгенофлуоресцентная сепарация. Эффективность применения процесса зависит от различных групп факторов, связанных с характеристиками обогащаемого сырья, обогатимостью сырья в стадиях предварительной концентрации, горно-геологическими характеристиками, физико-механическими свойствами сырья, особенностями схем и режимов рудоподготовки перед разделением, особенностями рентгенофлуоресцентного метода сепарации. Целью работы является изучение степени влияния факторов, определяющих целесообразность и условия применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации минерального сырья. В ходе выполненной работы применялись методы моделирования сортировки гипотетических руд по содержанию компонентов и экспериментальные исследования на рентгенофлуоресцентном сепараторе СРФ-100Л. Исследованиями установлено следующее: снижение содержания ценного компонента в сырье и увеличение степени раскрытия компонента повышает эффективность предварительной концентрации. Эффективность использования рудосортировочного комплекса для предварительной концентрации зависит от крепости руд и параметров технологии буровзрывных работ, от схемы и режимов операций дробления-грохочения рудосортировочного комплекса. При разработке технологий предварительной концентрации необходимо учитывать влияние на эффективность работы вещественного состава руды и раскрытия минеральных фаз в ней в той крупности, в которой ведется предварительная концентрация гранулометрического состава материала перед сепарацией, формируемого параметрами горных добычных работ и рудоподготовительными операциями дробления и грохочения, их схемой, числом выделенных для сортировки машинных классов. Результаты могут использоваться при разработке технологий предварительной концентрации руд с применением рентгенофлуоресцентной сепарации.

Ключевые слова: предварительная концентрация; методы разделения; рентгенофлуоресцентная сепарация; эффективность; рудосортировочный комплекс; особенности технологии; формирование гранулометрической характеристики; признак разделения; вещественный состав; раскрытия минеральных фаз; предельная обогатимость; физико-механические свойства пород; сортируемые классы.

Для цитирования: 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. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442.

Efficiency of X-ray radiometric separation in preliminary concentration of ore

E.F. Tsy-pin¹, Ovchinnikova T.Yu.¹, T.A. Efremova²

¹ Ural State Mining University, Russia

² Uralsmektanobr, Russia

Abstract: One of the efficient approaches to improvement of mineral processing technologies is the enhancement of ore pre-treatment with preliminary concentration. A promising dressing technique is X-ray fluorescent separation applied to various minerals to date. This process efficiency depends on various factors connected with characteristics of minerals to be processed, dressability of minerals in the preliminary concentration, geological characteristics, physical and mechanical properties of minerals, specifics of the pre-treatment circuits and modes, as well as with features of X-ray fluorescent separation. The research is aimed to study the influence of the factors which govern expediency and application condition of X-ray fluorescent separation for the preliminary concentration of mineral raw materials. The research methods were modeling of hypothetical ore grading with respect to the content of ore components with plotting of limit curves of separation, testing on X-ray fluorescent separator SRF-100L, theoretical analysis of formulas for calculating ultimate dressability indices as well as analytical calculations of particle size distribution and quality of complex ore separation by the ore separation plant circuit. The research has found that efficiency of the preliminary concentration grows with the lower content of useful component in raw material and with higher degree of dissociation of this component. Efficiency of using ore separation plant circuit in the preliminary concentration depends on the ore hardness and on drilling-and-blasting design, as well as on the circuit and modes of crushing and screening at the ore separation plant, including the number of the machine sorting classes accepted in the circuit. The preliminary concentration technologies with X-ray fluorescent separation should be developed with regard to the influence exerted on the ore separation efficiency by the material constitution of ore and dissociation of mineral phases to sizes suitable for the preliminary concentration, grain size composition of the material before separation, which depends on the parameters of mining, drilling-and-blasting and pre-treatment with crushing and screening, as well as on the ore separation plant circuit and machine sorting classes. The research results are applicable to development of the preliminary ore concentration technologies with X-ray fluorescent separation

Key words: preliminary concentration, X-ray fluorescent separation, efficiency, ore separation plant, technology specifics, granulometric characteristic formation, separation criterion, material constitution, dissociation of mineral phases, limit dressability, physical and mechanical properties of rocks, sorting classes.

For citation: Tsy-pin E.F., Ovchinnikova T.Yu., Efremova T.A. Efficiency of X-ray radiometric separation in preliminary concentration of ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):431-442. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442.

Введение

Стадиальные схемы обогащения позволяют выделять по стадиям либо отвальные хвосты, либо часть готового концентрата [1, 2]. В первой стадии может осуществляться предвари-

тельное обогащение. Если его целью является удаление части крупнокусковых отвальных хвостов, то происходит концентрирование ценного компонента в концентрате предварительного обогащения. Поскольку в данной стадии

минеральные фазы ценных компонентов руды не имеют значительного раскрытия, достаточного для получения качественных кондиционных концентратов, из горной массы могут быть удалены свободные от ценных минералов куски породных минералов. Тогда первая стадия обогащения является стадией предварительной концентрации. При этом повышается содержание ценных компонентов в продукте, направляемом в операции сокращения крупности и последующего глубокого обогащения.

Предварительная концентрация рассматривается в качестве перспективного направления развития технологии обогащения как в России [1, 2], так и в зарубежных странах [3–8].

На стадии предварительного обогащения используют различные методы разделения. Так, при обогащении железных и, в ряде случаев, марганцевых и хромовых руд применяют сухую магнитную сепарацию [1, 2], у́абсорбционную [9, 10], рентгеноабсорбционную [10] сепарации. При обогащении руд цветных, редких и благородных металлов предварительная концентрация осуществляет сортировку и сепарацию с использованием рентгенофлуоресцентного (рентгенорадиометрического) [11–15], рентгеноабсорбционного [10, 16], оптических методов в видимой [17] и ближней инфракрасной [8] областях спектра. Для предварительной концентрации урановых руд применяют радиометрический (у́радиометрический, авторадиометрический) [19] и рентгенофлуоресцентный [18, 20] методы. Для предварительного обогащения кварца и кварцитов эффективной является рентгенофлуоресцентная сепарация [21]. При сортировке углей может быть использована рентгеноабсорбционная сепарация [22].

Одним из наиболее перспективных методов предварительной концентрации минерального сырья является рентгенофлуоресцентный метод, позволяющий вести сортировку и сепарацию по содержанию химических элементов.

Эффективность предварительной концентрации значительно возрастает, если рудосортировочный комплекс расположен поблизости от разрабатываемого месторождения на значительном удалении от обогатительной фабрики глубокого обогащения. Это характерно при завершении отработки базовых месторождений вблизи обогатительной фабрики и вовлечении в переработку новых месторождений. Значительного эффекта следует ожидать при размещении рудосортировочных комплексов в подземных рудниках и использовании хвостов предварительного обогащения в подземных выработанных пространствах в качестве закладочного материала.

Предварительная концентрация осуществляется сразу после добычи (порционная сортировка) или после первых стадий дробления (покусковая сепарация) [2]. Значительная крупность материала определяет специфику применяемых процессов разделения и методов оценки их эффективности, на которую, кроме того, влияет ряд факторов, анализ и учёт которых может позволить принимать рациональные технологические решения.

Целью работы является изучение степени влияния факторов, определяющих целесообразность и условия применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации минерального сырья.

Методы исследований

В ходе выполненной работы применялись методы моделирования сортировки гипотетических руд по содержанию компонентов с получением

предельных кривых разделения, экспериментальные исследования на рентгенофлуоресцентном сепараторе СРФ-100Л, теоретический анализ формул оценки показателей предельной обогатимости, аналитические расчёты granulometric характеристик, показателей разделения полиметаллической руды по схеме рудосортировочного комплекса.

Эффективность применения рентгенофлуоресцентного метода зависит от ряда групп факторов, таких как вещественный состав сырья, содержание ценных (или вредных) компонентов, обогатимость сырья в стадии, в которой осуществляется разделение, горно-геологические условия залегания рудных тел и параметры технологии добычи сырья, физико-механические свойства сырья, технологические особенности схем и режимов рудоподготовки сырья непосредственно перед разделением, особенности метода и алгоритма сортировки.

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание полезного компонента в руде — один из важнейших факторов. Однако при рассмотрении необходимо учитывать технологическую задачу обогащения и требования к качеству конечных продуктов. При разделении с целью выделения хвостов (предварительная концентрация) более благоприятным случаем является малое содержание ценного компонента или минерала в руде. Действительно, если представить, что все минеральные фазы руды полностью раскрыты, т. е. частицы породы и минералы находятся в свободном состоянии, а все сростки отсутствуют, при этом разделение проведено идеально, то наилучшими технологическими показателями такого разделения будут:

$$\begin{aligned} \gamma_x &= (\beta - \alpha) / \beta_m; \quad \gamma_k = \alpha / \beta_m; \\ \vartheta &= 0; \quad \beta = \beta_m; \\ \varepsilon_{-k} &= 1; \quad \varepsilon_x = 0, \end{aligned}$$

где α, β, ϑ — содержание полезного компонента в исходном продукте, концентрате и хвостах соответственно; β_m — содержание полезного компонента в минерале, доли ед.; γ_k, γ_x — выход концентрата и хвостов, доли ед.; $\varepsilon_k, \varepsilon_x$ — извлечение в концентрат и хвосты, доли ед.

Поскольку β_m и α для конкретной руды — константы, то предельные технологические показатели разделения для задачи предварительной концентрации при полном раскрытии и заданном отвальном содержании полезного компонента в хвостах можно оценивать по выходу хвостов γ_x , при выполнении ограничений на отвальное содержание полезного компонента в хвостах — $\vartheta_{отв}$, тогда

$$\gamma_x = (\beta_m - \alpha) / (\beta_m - \vartheta_{отв}).$$

Из анализа формулы следует, что более технологичной при предварительной концентрации следует считать руду в том случае, если при её обогащении может быть получен максимальный выход хвостов. Уменьшение α приводит к увеличению выхода хвостов.

Следующим фактором является обогатимость сырья, характеризующая возможностью достижения определённой технологической цели в определённой стадии подготовки его к разделению, поскольку по стадиям обогащения изменяется крупность материала и может меняться раскрытие минеральных фаз.

Если в качестве признака разделения используется содержание компонента, показатели обогащения являются максимальными, а обогатимость предельной. Далее будем оценивать показатели предельной обогатимости,

поскольку в рентгенофлуоресцентном методе сепарации разделение ведётся по оценке содержания компонента.

Понятие обогатимости сырья связано с наличием и долей сростков с различным содержанием компонентов, что описывается функцией плотности распределения кусков по содержанию компонентов — $w(\alpha)$. Данная функция распределения меняется с изменением раскрытия минеральных фаз в обогащаемом материале. Она также зависит от содержания ценного компонента в руде. Результаты имитационного моделирования сортировки руды с разным раскрытием и разным содержанием компонентов в руде показывают, что выход хвостов при одинаковом ограничении на содержание компонента в хвостах увеличивается для руды с меньшим α и с уменьшением доли сростков со средним содержанием компонентов (рис. 1). Моделирование выполнено для различных покусковых распределений содержаний компонентов (табл. 1)

Анализ рис. 1 показывает, что при одинаковых ограничениях на содержание ценного компонента в хвостах (ϑ/α) выход хвостов увеличивается при уменьшении содержания компонента в исходном материале (кривая A в сравнении с кривыми B и C). Влияние раскрытия компонентов на технологические показатели разделения иллюстрируются кривыми B и C и соответствующими им графиками плотности распределения содержания компонентов сортируемых кусков в исходном материале — $w(\alpha)$.

Большое значение имеют параметры технологии добычи, связанные с условиями залегания рудных тел и физико-механическими свойствами сырья, которые можно отнести к горно-геологической группе факторов.

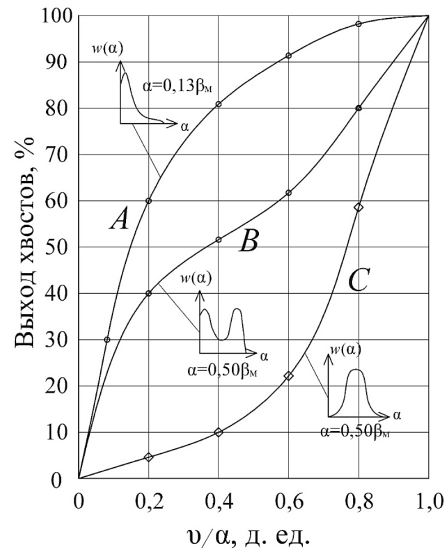


Рис. 1. Кривые предельной обогатимости при разном раскрытии (A, B, C) и разном содержании компонента в руде

Fig. 1. Maximum enrichment curves for different opening (A, B, C) and different content of the component in the ore

Свойства горнорудной массы, которые влияют на возможность и эффективность использования методов рентгенорадиометрического обогащения, определяются составом и свойствами рудного тела, параметрами системы разработки месторождения, способами отбойки, транспортирования горной массы и первичной обработки сырья на рудосортировочном комплексе или на обогатительной фабрике. Разъединение рудной и нерудной фаз происходит при разрушении горной массы.

Гранулометрический состав добытой руды определяется физико-механическими свойствами рудного материала и параметрами добычи с использованием буровзрывных работ.

К физико-механическим свойствам относят: крепость, степень трещиноватости горных пород и минералов. Чем крепче породы, тем больше кускового материала может быть подвергнуто обогащению,

Таблица 1

Принятые при моделировании плотности распределения содержания компонента по кускам

Used for modeling the density distribution of the component content in chunks

Тип распределения	Плотность распределения (доли ед.) ⁻¹ при интервалах содержания компонента, доли ед.				
	0,0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1,0
А	4,600	0,250	0,100	0,040	0,010
В	1,650	0,700	0,300	0,700	1,650
С	0,125	0,875	3,000	0,875	0,125

поскольку снижается выход мелких классов, обогащение которых с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации часто экономически невыгодно. При избирательном разрушении минеральных фаз предпочтительным случаем является тот, когда меньшей прочностью обладают полезные минералы. Это приводит к обеднению сортируемых классов и увеличению потенциального выхода хвостов предварительной концентрации.

Формирование гранулометрического состава руды начинается с буровзрывных работ. Гранулометрический состав отбитой горной массы определяется, помимо крепости и трещиноватости руды, способом и режимами её разрушения.

С увеличением трещиноватости при различных удельных расходах взрывчатых веществ выход крупных классов в отбитой руде снижается.

При необходимости получения руды с большим содержанием сортируемых классов, особенно если руда слабая или очень трещиноватая, целесообразно при горных работах снижение удельных расходов взрывчатых веществ [23], уменьшение частоты закладываемых зарядов, применение специальной геометрии их расположения.

Важную роль играют факторы подготовки сырья к сепарации. К ним относятся, с одной стороны, способы и режимы первичного дробления мате-

риала, эффективность грохочения, шкала грохочения, с другой — способы интенсификации различий рудных и нерудных кусков в измеряемых свойствах (промывка, очистка поверхности сортируемых кусков, направленное изменение поверхностных свойств рудных минералов). На основании анализа этой группы факторов формируется технологическая схема, выбираются режимы предварительной концентрации.

В предварительном обогащении с использованием рентгенорадиометрического метода формирование благоприятного гранулометрического состава руды начинается на этапе буровзрывных работ при добыче и продолжается при подготовке руды к сепарации в стадии предварительного обогащения с использованием операций дробления и грохочения.

Гранулометрическая характеристика сырья, поступающего на рудосортировочный комплекс (РСК), имеет большое значение для технологической и экономической оценки эффективной технологии. Важными факторами являются как размер максимального куска, так и преобладание крупных либо мелких классов крупности. При буровзрывных работах формируется гранулометрическая характеристика горной массы. Необходимо стремиться к тому, чтобы размер максимального куска руды, поступающего в РСК, был не меньше

допустимого размера максимального куска, регламентируемого технической характеристикой сепаратора.

Многократными экспериментальными исследованиями различных руд в стадиях дробления установлено, что с уменьшением крупности значительного раскрытия минеральных фаз не происходит. Это подтверждается незначительными изменениями показателя контрастности в разных классах крупности руд, например, в медьсодержащей руде одного из месторождений в классах крупности +50, -50+25 и 25+13 мм показатель контрастности M равен 0,985, 0,904 и 0,883 соответственно, то есть меняется незначительно.

В идеале в стадии предварительной концентрации руда должна быть дроблена до максимально допустимой крупности и разделена на сортируемые машинные классы и несортируемый класс.

Гранулометрическая характеристика поступающей на сепарацию руды определяет потенциальный выход сортируемых классов, и, следовательно, выход отвальных хвостов предварительного обогащения, и потенциальные капитальные затраты, уровень которых во многом зависят от числа используемых рентгенометрических сепараторов.

В табл. 2 приведены значения выходов сортируемых классов (+25 мм) для условий дробления исходной руды рудосортировочного комплекса в щековой дробилке. Рассмотрены варианты дробления крепкой (твёрдые руды), некрепкой (мягкие руды) и руды средней крепости для случаев разной крупности.

Значения выходов классов крупности + 25 мм исходной руды приняты по типовым гранулометрическим характеристикам продуктов крупного дробления [24].

Анализируя приведенные значения выхода сортируемого класса, можно констатировать, что они в зависимости от качества выполнения буровзрывных работ, физико-механических свойств горнорудной массы, могут меняться в значительных пределах.

Пропорционально выходу сортируемого класса изменяется выход отвальных хвостов предварительной концентрации.

Таким образом, при выборе схем и режимов предварительной концентрации руды с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации следует предусматривать приемлемые условия для рационального формирования гранулометрической характеристики руды, подаваемой на сепарацию.

Если максимальная крупность дроблёного материала меньше предельной крупности сепарации, выход сортируемого класса снижается, вместе с этим снижается выход отвальных хвостов РСК.

Принципиальным является вопрос о числе машинных классов сортировки.

Необходимость ограничений на ширину машинных классов, а следовательно, на их число, вытекает из зависимости требуемого уровня граничного значения параметра разделения для получения хвостов сепарации с заданным содержанием ценного компонента от крупности сортируемого материала. Это иллюстрируется экспериментальными результатами, полученными при сепарации полиметаллической руды с ценными компонентами свинец, цинк и медь (рис. 2).

Исследования проводились на рентгенофлуоресцентном сепараторе СРФ1 – 100 Л на разных узких и объединенных широких классах крупности с изменением граничных значений параметра разделения H , взвешиванием полученных продуктов и химическим анализом проб этих продуктов.

Таблица 2

Суммарный выход сортируемого класса (+25 мм) при дроблении руды разной крепости в щековой дробилке крупного дробления

The total output of the sorted class (+25 mm) when crushing ore of different strength in a large jaw crusher

Размер максимального куска руды, поступающей на РСК (питание щековой дробилки), мм	Суммарный выход сортируемого класса, %		
	мягкая руда (некрепкая)	средней твёрдости руда (средняя крепость)	твёрдая руда (крепкая)
100	50	62	73
200	77	82	88
300	86	91	94

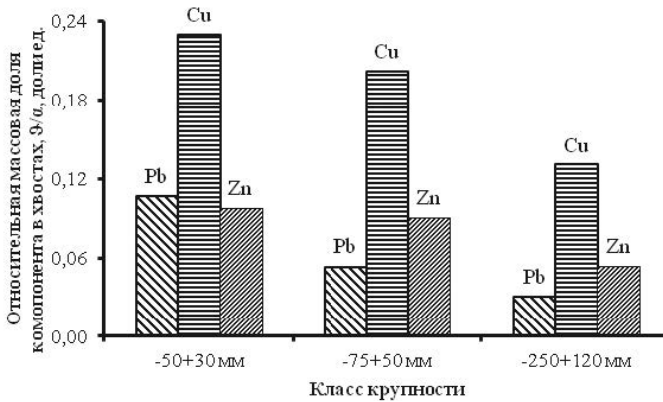


Рис. 2. Изменение массовой доли компонента в хвостах с увеличением крупности сортируемого материала при фиксированном значении граничного параметра разделения $H = 0,4$ усл. ед.

Fig. 2. Change in the mass fraction of the component in the tailings with an increase in the size of the sorted material at a fixed value of the boundary separation parameter $H = 0,4$ us. ed.

В данном случае в качестве параметра разделения полиметаллической руды на рентгенофлуоресцентном сепараторе СРФ1 – 100Л использовано спектральное отношение в виде

$$H = (N_{Cu+Zn} + N_{Pb}) / N_s, \quad (2)$$

где N_{Cu+Zn} – сумма интенсивностей (числа импульсов) меди и цинка в объединённой области вторичного характеристического рентгеновского излучения меди и цинка, усл. ед.; N_{Pb} – интенсивность (число импульсов) свинца в области вторичного характеристического рентгеновского излучения свинца, усл. ед.; N_s – интенсивность (число импульсов) в области рассеянного первичного излучения, усл. ед.

Суммарный выход хвостов по всем машинным классам для разного их числа существенно меняется. Он минимален при одном машинном классе и растёт с увеличением числа машинных классов.

При экспериментальных исследованиях рентгенофлуоресцентной сепарации полиметаллической руды, проведённых в одном (–120+30 мм), двух (–120+60, –60+30 мм) и трёх (120+75, –75+50, –50+30 мм) машинных классах с использованием в качестве параметра разделения спектрального отношения (формула (2)) [25], показано, что при обогащении в двух машинных классах прирост суммарного выхода хвостов, по сравнению с выходом

при обогащении в одном машинном классе, составляет 33,33 %. В то же время при обогащении в трёх машинных классах прирост выхода, по сравнению с выходом при обогащении в одном машинном классе, может увеличиться на 40,17 %

Заключение

Проанализировано влияние на эффективность предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации, количественно оцениваемого выходом отвальных хвостов РСК при фиксированных значениях массовой доли компонента в них, вещественного состава руды, в частности содержания ценных компонентов в ней, раскрытия компонентов в руде, гранулометрической характеристики руды, подготовленной к рентгенометрической сепарации, числа машинных классов сортировки, обогащенных в различной крупности.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологий предварительной концентрации руд с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации на горно-обогатительных и горно-металлургических предприятиях, перерабатывающих различные виды минерального сырья, поскольку применение предварительной концентрации может привести к снижению общих капитальных затрат и эксплуатационных расходов предприятий в целом. Особенно перспективно использование подобных технологий при вовлечении в переработку руд удалённых от обогатительных фабрик месторождений, весьма бедных и забалансовых руд. Высокой эффективности использования предварительной концентрации сырья в горно-обогатительном переделе можно ожидать также при размещении сортировочных комплексов в подземных рудниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бочаров В.А., Игнаткина В.А.* Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. — М.: Руда и металлы, 2007. — 472 с.
2. *Цыпин Е.Ф.* Обогащение в стадиях рудоподготовки: научн. монография — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. — 303 с.
3. *Максимов И.И.* XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. — № 3. — С. 3—11.
4. *Максимов И.И.* XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 2) // Обогащение руд. 2015. — № 6. — С. 50—58.
5. *Härkki K.* Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. Proceedings of the XXVII International Mineral Congress. Santiago, Chile, 2014 Chapter 1 Plenary Presentations. pp. 2–22.
6. *Kolacz J.* Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing // Proceedings of the XXVII International Mineral Congress. Santiago, Chile, 2014. Chapter 16. Classification, screening and sorting. — pp. 106—115.
7. *Gleeson D.* Preceding processing // International Mining. March, 2019. — pp. 82—87.
8. *Shekwonyadu Iyakwari, Hylke J. Glass, Gavyn K. Rollinson, Przemyslaw B. Kowalczyk* Application of near infrared sensors to preconcentration of hydrothermally-formed copper ore // Minerals Engineering, Volume 85, January 2016, pp. 148—167.
9. *Старчик Л.П., Касьян В.Т.* Рациональные классы крупности для радиометрической сепарации кусковых железных руд // Известия вузов. Горный журнал. 1985. — № 2. — С. 107—112.

10. Малахов Г.М., Соцкий А.Р., Азарян А.А. Возможности использования гамма-абсорбционного метода для сортировки и обогащения хромовой руды // Горный журнал. — 1971. № 3. — С.67–69.

11. Кобзев А.С. Направления развития и проблемы радиометрических методов обогащения минерального сырья // Обогащение руд. 2013. № 1. — С. 13–17.

12. Фёдоров Ю.О., Кацер И.У., Корнев О.В., Короткевич В.А., Цой В.П., Ковалев П.И., Фёдоров М.Ю., Поповский Н.С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. — № 5. — С. 21–37.

13. Санакулов К.С., Руднев С.В. Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения «Кокпатас» // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1(40). — С. 3–7.

14. Санакулов К.С., Руднев С.В., Канцель А.В. О возможности отработки месторождения «Учкулач» с использованием технологии рентгенорадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. — № 1(44). — С. 17–20.

15. Lixia Lia, Genzhuang Lib, Huaizhe Lic, Guoqing Lib, Ding Zhangc, Bern Klein Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting // Minerals Engineering, Volume 121, 1 June 2018, pp. 129–136.

16. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine // Proc. of the XXVII Intern. Mineral Processing Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. pp. 159–168.

17. Рябкин В.К., Литвинцев Э.Г., Тихвинский А.В., Корпенко И.А., Пичугин А.Н., Кобзев А.С. Полихромная фотометрическая сепарация золотосодержащих руд // Горный журнал. 2007. — № 12. — С. 88–92.

18. Petr Mikysek, Tomáš Trojek, Noemi Mészárosová, Jiří Adamovič, Marek Slobodník. X-ray fluorescence mapping as a first-hand tool in disseminated ore assessment: sandstone-hosted U–Zr mineralization // Minerals Engineering, Volume 141, September 2019, Article 105840.

19. Татарников А.П., Асонова Н.И., Балакина И.Г., Наумов М.Е., Коновалов Г.Н., Воеводин И.В. Современные технологии и оборудование для радиометрического обогащения урановых руд // Горный журнал. 2007. — № 2. — С. 85–87.

20. Колесаев В.Б., Литвиненко В.Г., Култышев В.И. Комбинированная технология переработки бедных урановых руд // Горный журнал. 2008. — № 8. — С. 50–53.

21. Шемякин В.С., Скопов С.В., Маньковский Р.В., Красильников П.А., Мамонов Р.С. Предварительное обогащение кварцевого сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2016. №8. — С. 74–79.

22. Алушкин И.В., Щипчин В.Б., Корнеев И.Г. Рентген-радиометрическая сепарация от TOMRA Sorting для предварительного обогащения угля // Уголь. 2014. — № 5. — С. 100–103.

23. Архипов О.А. Радиометрическая обогатимость руд при их разведке. М.: Недра, 1985. 144 с.

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

25. Цыпин Е.Ф., Ефремова Т.А., Овчинникова Т.Ю., Елизаров Д.Б. Влияние фракционирования по крупности на эффективность рентгенорадиометрической сепарации полиметаллической руды // Обогащение руд, 2018. — № 3. — С. 14–19. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Mineral beneficiation technology]. Vol. 1 Moscow, «Ore and Metals» Publishing House, 2007, 472 P. [In Russ]

2. Tsypin E.F. *Obogashchenie v stadiyakh rudopodgotovki* [Enrichment in the stages of ore preparation]. Ekaterinburg, Ural State Mining University, 2015, 303 P. [In Russ].
3. Maksimov I.I. The XXVIIth International Mineral Processing Congress (Part 1). *Obogashchenie Rud.* 2015 no 3 pp. 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01. [In Russ].
4. Maksimov I.I., Baranov V.F., Bogdanovich A.V., Kibirev V.I. The XXVIIth International Mineral Processing Congress (Part 2). *Obogashchenie Rud.* 2015 no 6 pp. 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10. [In Russ].
5. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. Proceedings of the XXVII International Mineral Congress. Santiago, Chile, 2014 Chapter 1 Plenary Presentations. pp. 2–22.
6. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing. Proceedings of the XXVII International Mineral Congress. Santiago, Chile, 2014. Chapter 16. Classification, screening and sorting. pp. 106–115.
7. Gleeson D. Preceding processing. *International Mining*. March, 2019. pp. 82–87.
8. Shekwonyadu Iyakwari, Hylke J. Glass, Gavyn K. Rollinson, Przemyslaw B. Kowalczyk Application of near infrared sensors to preconcentration of hydrothermally-formed copper ore. *Minerals Engineering*, Volume 85, January 2016, pp. 148–167.
9. Starchik L.P., Kasyan V.T. Rational size classes for radiometric separation of lumpy iron ores. *Izvestiya Vuzov. Gornyy Zhurnal*. 1985. no 2. pp. 107–112. [In Russ].
10. Malakhov G.M., Sotsky A.R., Azaryan A.A. On the possibility of using the gamma-absorption method for sorting and beneficiation of chromium ore. *Gornyi Zhurnal*. 1971, no 3, pp. 67–69. [In Russ].
11. Kobzev A.S. Trends of development and problems related to sensor-based mineral sorting. *Obogashchenie Rud.* 2013 no 1. pp. 13–17. [In Russ].
12. Fedorov Yu. O., Katser I.U., Korenev O.V., Korotkevich V.A., Tsoy V.P., Kovalev P.I., Fedorov M. Yu., Popovskiy N.S. Experience and practice of X-ray radiometric separation of ores. *Izvestiya Vuzov. Gornyy Zhurnal*. 2005, no 5, pp. 21–37. [In Russ].
13. Sanakulov K.S., Rudnev S.V. Complex for X-ray radiometric beneficiation of the Kokpatas field sulphide ores. *Gornyi Vestnik Uzbekistana*. 2010, no 1 (40). pp. 3–7. [In Russ].
14. Sanakulov K.S., Rudnev S.V., Kantsel A.V. On the possibility of working out the Uchkulach deposit using the technology of X-ray radiometric beneficiation of lead-zinc ores. *Gornyi Vestnik Uzbekistana*. 2011, no 1 (44). pp. 17–20. [In Russ].
15. Lixia Lia, Genzhuang Lib, Huaizhe Lic, Guoqing Lib, Ding Zhangc, Bern Klein Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting. *Minerals Engineering*, Volume 121, 1 June 2018, pp. 129–136.
16. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine. Proc. of the XXVII Intern. Mineral Processing Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. pp. 159–168.
17. Ryabkin V.K., Litvintsev E.G., Tikhvinskii A.V., Korpenko I.A., Pichugin A.N., Kobzev A.S. Polychrome photometric separation of gold ores. *Gornyi Zhurnal*. 2007, no 12. pp. 88–92. [In Russ].
18. Petr Mikysek, Tomáš Trojek, Noemi Mészárosová, Jiří Adamovič, Marek Slobodník X-ray fluorescence mapping as a first-hand tool in disseminated ore assessment: sandstone-hosted U–Zr mineralization. *Minerals Engineering*, Volume 141, September 2019, Article 105840.
19. Tatarnikov A.P., Asonova N.I., Balkina I.G., Naumov M.E., Kononov G.N., Voevodin I.V. Modern technologies and equipment for radiometric concentration of uranium ores. *Gornyi Zhurnal*. 2007, no 2. pp. 85–87. [In Russ].
20. Kolasayev V.B., Litvinenko V.G., Kultyshev V.I. Combined technology of lean uranium ores processing. *Gornyi Zhurnal*. 2008, no 8. pp. 50–53. [In Russ].
21. Shemiakin V.S., Skopov S.V., Mankovskii R.V., Krasil'nikov P.A., Mamonov R.S. Preliminary concentration quartz raw material. *Izvestiya Vuzov. Gornyy Zhurnal*. 2016. no 8. pp. 74–79. [In Russ].

22. Alushkin I.V., Shchipchin V.B., Korneev I.G. TOMRA sorting X-ray radiometric separation for preliminary coal preparation. *Ugol'*, 2014, no 5, pp. 100–103. [In Russ].

23. Arkhipov O.A. *Radiometricheskaya obogatimost' rud pri ikh razvedke* [Radiometric ore dressability under its exploration]. Moscow, «Mineral resources» Publishing House, 1985. 144 P. [In Russ].

24. Gazaleeva G.I., Tsy-pin E.F., Chervyakov S.A. *Rudopodgotovka: droblenie, grokhozhenie, obogashchenie* [Ore preparation: crushing, screen sizing, separation]. Ekaterinburg, Ural Center for Academic Services, 2014. 914 P. [In Russ].

25. Tsy-pin E.F., Efremova T.A., Ovchinnikova T. Yu., Elizarov D.B. Effect of size fractionation on the efficiency of X-ray radiometric separation of polymetallic ore. *Obogashchenie Rud.* 2018 no 3 pp. 14–19. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.03.03.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Цыпин Евгений Федорович*¹ — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, tsipin.e@mail.ru,

*Овчинникова Татьяна Юрьевна*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, tt2979@yandex.ru,

*Ефремова Татьяна Александровна*² — научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья, отдел обогащения, efremova_ta@umbr.ru,
¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, 620144, ГСП-126, ул. Куйбышева, 30,

² ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, 620144, ул. Хохрякова, 87.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Tsy-pin E.F.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chair of Mineral Processing, tsipin.e@mail.ru,

*Ovchinnikova T.Yu.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chair of Mineral Processing, tt2979@yandex.ru,

*Efremova T.A.*², Researcher, Laboratory for Processing of Nonferrous Metal Ores and Mining Waste, efremova_ta@umbr.ru,

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia,

² Uralmexhanobr, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 21.11.2019; получена после рецензии 20.03.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 21.11.2019; received after the review 20.03.2020; accepted for printing 20.03.2020.

