

ВЛИЯНИЕ АЛГОРИТМА РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ

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

¹ Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru
² АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

Аннотация: Применение рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительного обогащения руд, содержащих два и более ценных компонента, будет эффективно при использовании алгоритмов разделения, позволяющих выделять продукты, чаще всего коллективные хвосты, с заданным качеством по всем ценным компонентам. На примере пробы двухкомпонентной медно-цинковой руды рассмотрено использование R-алгоритма, учитывающего в предельном случае содержания обоих ценных компонентов с весовыми коэффициентами, либо использование в аппаратном варианте комплексного аналитического параметра разделения, представляющего сумму рентгеноспектральных оценок и по меди, и по цинку, одна из которых умножена на постоянный коэффициент. Выявлено, что выбор эффективного алгоритма разделения для предварительного обогащения комплексного сырья рентгенофлуоресцентным методом зависит от покусковых плотностей распределения всех ценных компонентов в руде. Изучение влияния весовых коэффициентов на показатели разделения выявило, что весовой коэффициент значительно влияет на выход коллективных хвостов при заданных ограничениях на содержания ценных компонентов в них. Можно отметить, что для изученной пробы изменение весового коэффициента изменяет потенциальный выход коллективных хвостов, который также существенно зависит от заданных содержаний ценных компонентов в хвостах. Описанная методика отыскания алгоритма разделения может быть применена при расчете потенциальных технологических показателей, а также при выборе настроек рентгенофлуоресцентных сепараторов в случае предварительного обогащения комплексных, в том числе многокомпонентных, руд методом рентгенофлуоресцентной сепарации.

Ключевые слова: предварительное обогащение, рентгенофлуоресцентная сепарация (РФС), рентгенотрансмиссионная сепарация (РТС), фракционные характеристики, аналитический параметр, прогноз технологических показателей, медно-цинковая руда, эффективность сепарации.

Для цитирования: 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. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_208.

The influence of X-ray fluorescence separation algorithm on the effectiveness of pre-concentration of copper–zinc ore

E.F. Tsypin¹, T.A. Efremova², T.Yu. Ovchinnikova¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru

² JSC «Uralmekhanobr», Ekaterinburg, Russia

Abstract: The use of X-ray fluorescence separation for pre-concentration of ores that containing two or more valuable components will be effective when using separation algorithms that allow the separation of products, most often collective tailings, with a given quality for all valuable components. Using the example of a sample of two-component copper-zinc ore, the use of an R-algorithm is considered, taking into account, in the limiting case, the content of both valuable components with weighting coefficients, or the use in the hardware version of a complex analytical separation parameter representing the sum of X-ray spectral estimates for both copper and zinc, one of which is multiplied by a constant coefficient. It is revealed that the choice of an effective separation algorithm for the pre-concentration of complex raw materials by the X-ray fluorescence method depends on the lump density distribution of all valuable components in the ore. The study of the influence of weighting coefficients on separation indicators showed that the weighting coefficient significantly affects the yield of collective tails under given restrictions on the content of valuable components in them. It can be noted that for the studied sample, a change in the weight coefficient changes the potential yield of collective tails, which also significantly depends on the specified contents of valuable components in the tails. The described method of finding the separation algorithm can be applied when calculating potential technological indicators, as well as when choosing the settings of X-ray fluorescence separators in the case of pre-enrichment of complex, including multicomponent ores by X-ray fluorescence separation.

Key words: preliminary ore dressing, X-ray fluorescence separation (XRF), X-ray transmission separation (XRT), fractional characteristics, analytical parameter, forecast of technological indicators, copper-zinc ore, separation efficiency.

For citation: Tsypin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Yu. The influence of X-ray fluorescence separation algorithm on the effectiveness of pre-concentration of copper–zinc ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(1-1):208-220. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_208.

Введение

В современных условиях предварительное обогащение руд [1] становится все более востребованным [2]. Предварительному обогащению с целью повышения содержания ценных компонентов в продуктах последующей обогатительной переработки за счет удаления кусковых хвостов подвергают железные [3, 4], марганцевые [5, 6], хромитовые [7, 8], медные [9] и медно-цинковые [10], полиметаллические [11], урановые [12], золо-

тосодержащие [13, 14] и редкометалльные [10, 15] руды, а также неметаллические полезные ископаемые, такие как магнезиты и бруситы [16, 17], фосфориты [2, 18], кварцевое сырье [10], асбестовые руды [19, 20], уголь [21, 22] и многие другие виды минерального сырья.

Для предварительного обогащения наряду с использованием гравитационных [2, 11], магнитных [2, 23] методов, избирательного дробления-грохочения все большее распространение получа-

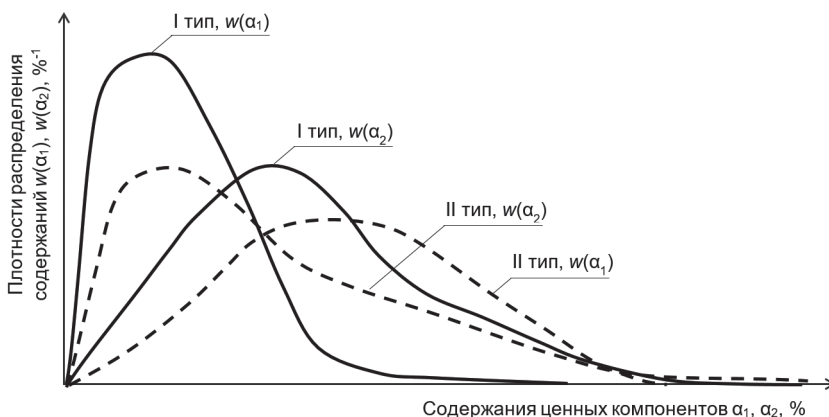


Рис. 1. Гипотетические плотности распределения содержаний ценных компонентов в руде
 Fig. 1. Hypothetical densities of distribution of the contents of valuable components in the ore

ют информационные (или, в иной терминологии — сенсорные [24], интеллектуальные, радиометрические, реже специальные) методы сортировки и сепарации, среди которых для специфических видов сырья важное значение имеют такие методы, как радиометрический [25, 26] для урановых руд; фотонейтронный [27] для бериллиевых руд; рентгенолюминесцентный для алмазосодержащего сырья [5] и шеелитовых руд [20]. Более универсальными и в настоящее время широко применяемыми методами сортировки и сепарации являются рентгено-трансмиссионный (рентгеноабсорбционный) [2, 12, 28] и рентгенофлуоресцентный (рентгенорадиометрический) [2, 12, 28] методы.

При наличии нескольких ценных компонентов в руде на потенциальный выход хвостов влияют покусковые распределения содержаний этих компонентов. При относительно малых содержаниях ценных компонентов, как, например, меди и цинка в медно-цинковой руде, плотности распределения покусковых содержаний правоасимметричны (имеют положительную асимметрию). Среднее содержание компонентов в руде и степень их раскрытия в крупности сортировки определяют вид кривой плотно-

сти распределения содержаний (рис. 1), что влияет на потенциальный выход хвостов разделения. Кроме того, предельное значение выхода хвостов для комплексной руды зависит от задаваемых технологическим соображениям ограничений на допустимое содержание всех ценных компонентов в хвостах.

В разных типах руд среднее содержание и характер покусковых распределений содержаний ценных компонентов могут быть различными, что иллюстрирует рис. 1.

Для руды I типа можно отметить большую долю кусков, бедных по первому компоненту, и меньшую долю кусков, бедных по второму компоненту. Для руды II типа картина обратная. Можно предположить, что в первом случае компонентом, лимитирующим выход хвостов заданного качества, будет значение содержания в отвальных хвостах второго компонента, а во втором случае — первого.

При обогащении комплексных руд рентгенофлуоресцентный метод имеет важное преимущество перед прочими методами, поскольку при его использовании возможно определение оценок содержаний нескольких представляющих интерес элементов и учет их в алгорит-

мах принятия решения при удалении из основного потока некондиционных (или кондиционных) кусков [29].

В качестве оценок содержаний элементов могут использоваться интенсивности вторичного характеристического рентгеновского излучения в спектральных областях соответствующих элементов N_i либо, например, H_i — спектральные отношения интенсивностей N_i к интенсивности рассеянного рентгеновского излучения N_s :

$$H_i = N_i / N_s.$$

Для случая, когда в руде находится n ценных компонентов в качестве значения аналитического параметра, по которому ведется сортировка кусков, может быть использована формула

$$R = \sum_{i=1}^n k_i N_i / N_s = \sum_{i=1}^n k_i H_i, \quad (1)$$

где k_i — весовой коэффициент для i -го элемента, учитывающий либо среднее содержание данного элемента в обогащаемом материале, либо иную важную характеристику элемента, например, его относительную стоимость.

Очевидно, что при решении технологической задачи выделения коллективных хвостов значение коэффициентов также является важным фактором, определяющим потенциальный выход хвостов при выполнении условия достижения содержаний каждого из элементов в хвостах не выше допустимых значений, задаваемых в конкретных случаях по технологическим либо экономическим соображениям.

Целью исследования является показ необходимости выбора значений коэффициентов в алгоритмах сортировки комплексных руд для обеспечения максимального выхода хвостов при выполнении ограничений по содержанию ценных компонентов в хвостах предварительного обогащения.

В качестве объекта исследования рассмотрена проба сульфидной медно-цинковой руды, в которой ценными компонентами являются медь и цинк.

Методика исследований

Исследования проведены в два этапа. На первом этапе из технологической пробы выделен класс крупности $-100+50$ мм, от которого отобрано 100 кусков. Для каждого из кусков выборки с четырех сторон сняты рентгеновские спектры и рассчитаны усредненные значения интенсивностей вторичного характеристического рентгеновского излучения в спектральных областях меди, цинка и рассеянного излучения, затем вычислены спектральные отношения по меди H_{Cu} и цинку H_{Zn} . Затем для каждого куска по формуле (1) рассчитаны значения комплексного аналитического параметра R_k в варианте

$$R_k = H_{Cu} + k \cdot H_{Zn}, \quad (2)$$

при различных коэффициентах k (0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,70; 2,00).

На втором этапе каждый кусок выборки был взвешен, измельчен и проанализирован на содержание меди и цинка. В изученной пробе средневзвешенная массовая доля меди составила 2,07% (от 0,005 до 16%), а цинка — 3,48% (от 0,005 до 41,9%).

По значениям аналитических параметров кусков, их массам и содержаниям меди и цинка рассчитаны и построены кривые разделения по комплексному аналитическому параметру R_k , представляющие функции $\gamma_x = f(R_k)$; $\vartheta_{Cu} = f(R_k)$; $\vartheta_{Zn} = f(R_k)$.

По кривым разделения при задаваемых значениях содержаний компонентов в коллективных хвостах определены выходы хвостов при условии выполнения ограничений по допустимому содержанию всех ценных компонентов, то есть по кривым по заданным вели-

Таблица 1

Плотности распределения по содержаниям меди и цинка для изученной пробы
Distribution densities by copper and zinc contents for the studied sample

Границы фракций по массовой доле ценного компонента, %		Средняя массовая доля $\alpha_{(Cu; Zn)}$, %	Выход фракции γ , д.ед.	Плотность распределения $w(\alpha_{(Cu; Zn)})$, % ⁻¹
Плотность распределения по меди				
0,005	0,2	0,06	0,4217	2,1627
0,2	0,4	0,31	0,0809	0,4043
0,4	0,5	0,41	0,0264	0,2641
0,5	2	0,81	0,1992	0,1328
2	4	3,34	0,0350	0,0175
4	6	4,99	0,1106	0,0553
6	8	7,05	0,0584	0,0292
8	10	8,54	0,0263	0,0131
10	16	13,04	0,0415	0,0069
Плотность распределения по цинку				
0,005	0,2	0,05	0,3493	1,7914
0,2	0,4	0,26	0,0533	0,2663
0,4	1	0,71	0,1124	0,1874
1	2	1,47	0,1588	0,1588
2	4	2,62	0,1603	0,0801
4	10	6,97	0,0718	0,0120
10	12	11,88	0,0088	0,0044
12	20	14,76	0,0451	0,0056
20	41,9	35,83	0,0402	0,0018

понентов либо от соотношения ценных компонентов.

Для алгоритмов сортировки руды рассчитаны и построены кривые разделения по комплексному аналитическому параметру R_k , рассчитанному по формуле (2), при различных значениях k , и по предельному аналитическому параметру R , рассчитанному по формуле (3).

На рис. 3 приведены кривые разделения изученной пробы, рассчитанные при $k = 1$ для R (рис. 3, а) и R_k (рис. 3, б). По кривым разделения для заданных ограничений по содержанию компонентов в хвостах $\vartheta_{Cu} = 0,1\%$ и $\vartheta_{Zn} = 0,2\%$ графически определен выход хвостов.

При определении выхода хвостов для заданных ограничений по обоим ценным компонентам выбирается наименьшее из полученных по кривой выхода (γ_x) значений. Для изученной пробы руды для алгоритмов, приведенных на рис. 3, а, выход хвостов при ограничении на цинк $\vartheta_{Zn} = 0,2\%$ составил 0,345 д.ед., а при ограничении на медь $\vartheta_{Cu} = 0,1\%$ – 0,375 д.ед. Для случая использования сортировки по рентгеновскому комплексному параметру при аналогичных ограничениях по меди и цинку (рис. 3, б), выход коллективных хвостов составил 0,34 д.ед. при ограничении на медь и 0,30 д.ед. при ограничении на цинк.

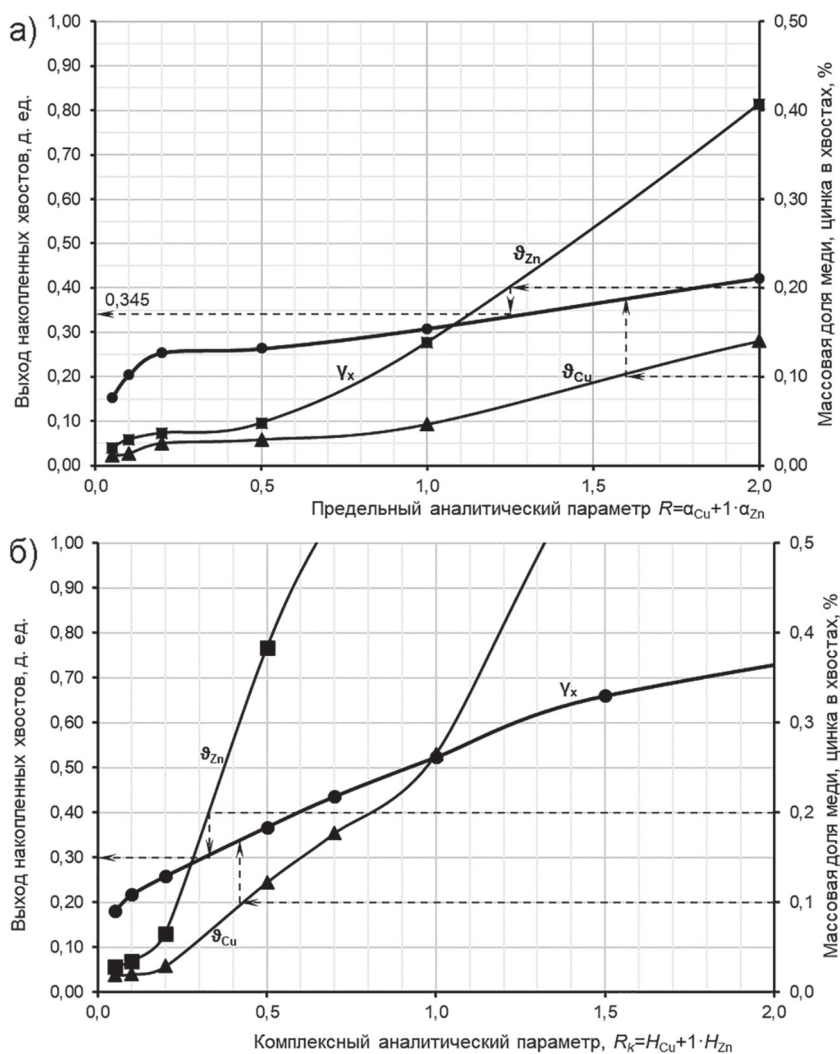


Рис. 3. Кривые разделения изученной пробы для $k = 1$: по предельному аналитическому параметру R (а); по комплексному аналитическому параметру R_k (б)

Fig. 3. The separation curves of the studied sample for $k = 1$: according to the limiting analytical parameter R (a); according to the complex analytical parameter R_k (b)

Для оценки влияния коэффициента k на результаты разделения по комплексному аналитическому параметру были рассчитаны технологические показатели разделения для разных заданных ограничений на содержание меди и цинка в коллективных хвостах (табл. 2).

Из рис. 2 и 3 и табл. 1 и 2 можно сделать следующие выводы: для изученной пробы более действенным ограничени-

ем является ограничение по содержанию цинка в коллективных хвостах. Это объясняется тем, что для руды характерно преобладание цинка над медью ($\alpha_{Zn}/\alpha_{Cu} = 1,68$). Анализ поля корреляции ценных компонентов (см. рис. 2) говорит об отсутствии взаимосвязи между содержаниями меди и цинка, при этом в поле корреляции можно выделить условно бедную зону, соответствующую кускам

Таблица 2

Технологические показатели разделения для различных алгоритмов
Technological separation indicators for various algorithms

Алгоритм разделения $R_k = H_{Cu} + k \cdot H_{Zn}$	Выход хвостов, %	Массовая доля в хвостах, %		Извлечение в хвосты, %	
		Cu	Zn	Cu	Zn
при $\vartheta_{Cu} = 0,10\%$ и $\vartheta_{Zn} = 0,20\%$					
$k = 0$	20,0	0,01	0,20	0,10	1,15
$k = 0,5$	30,0	0,07	0,20	1,01	1,73
$k = 1,0$	30,0	0,07	0,20	1,01	1,73
$k = 1,5$	30,0	0,10	0,10	1,45	0,86
$k = 2,0$	28,0	0,10	0,08	1,35	0,64
при $\vartheta_{Cu} = 0,20\%$ и $\vartheta_{Zn} = 0,30\%$					
$k = 0$	20,0	0,02	0,30	0,19	1,73
$k = 0,5$	34,0	0,09	0,30	1,47	2,93
$k = 1,0$	34,0	0,09	0,30	1,47	2,93
$k = 1,5$	35,0	0,12	0,30	2,03	3,02
$k = 2,0$	36,0	0,18	0,30	3,13	3,11
при $\vartheta_{Cu} = 0,20\%$ и $\vartheta_{Zn} = 0,40\%$					
$k = 0$	21,0	0,03	0,40	0,30	2,41
$k = 0,5$	39,0	0,12	0,40	2,26	4,44
$k = 1,0$	37,5	0,14	0,40	2,53	4,52
$k = 1,5$	38,0	0,15	0,40	2,75	4,37
$k = 2,0$	38,0	0,20	0,37	3,67	4,05
при $\vartheta_{Cu} = 0,30\%$ и $\vartheta_{Zn} = 0,30\%$					
$k = 0$	21,0	0,03	0,30	0,30	1,81
$k = 0,5$	35,0	0,09	0,30	1,52	3,02
$k = 1,0$	34,0	0,10	0,30	1,64	2,936
$k = 1,5$	35,0	0,12	0,30	2,03	3,02
$k = 2,0$	36,0	0,18	0,30	3,13	3,11

с низкими содержаниями по обоим компонентам, что свидетельствует о возможности выделения из пробы бедных коллективных хвостов.

Безусловно, характер распределения ценных компонентов по кускам влияет на показатели разделения; чем более правоасимметрична характеристика плотности распределения ценного компонента, тем больший выход хвостов можно получить, что ярко отслеживается при сор-

тировке однокомпонентных руд. С ростом количества ценных компонентов на показатели разделения, помимо покусковых распределений содержаний элементов, значимое влияние оказывает и покусковая взаимосвязь ценных компонентов (поле корреляции). В связи с этим анализ влияния весовых коэффициентов на показатели разделения приобретает особое значение. Выбор алгоритма выделения коллективных хвостов

зависит от конкретных покусковых распределений содержаний для элементов.

Рассмотренные варианты разделения изученной пробы по R-алгоритму (с наклонной кривой разделения) с разными значениями коэффициента k показали, что возможно выделение коллективных хвостов различного качества (см. табл. 2) при заданных ограничениях по обоим ценным компонентам.

По полученным результатам можно отметить, что весовой коэффициент значительно влияет на выход хвостов, при заданных ограничениях ценных компонентов в них. Можно отметить, что изменение весовых коэффициентов в большей степени отражается на варибельности массовой доли меди в хвостах, чем на содержании цинка в них. При этом какую-либо фиксированную закономерность отследить не получится, поскольку с ростом (изменением) граничных значений ценных компонентов в хвостах изменяется и количество кусков для анализа, а следовательно, меняется характеристика покусковой взаимосвязи ценных компонентов. В связи с чем просматривается необходимость выбора весовых коэффициентов при каждой смене ограничений по содержанию ценных компонентов в коллективных хвостах с целью увеличения выхода хвостов при заданных ограничениях.

Результаты исследований показали, что при рентгенофлуоресцентной сепарации различных комплексных руд требуется отыскание рациональных значений весовых коэффициентов при аналитических параметрах, характеризующих содержание всех ценных компонентов, что повысит выход коллективных хвостов сепарации.

Предложения по практическому применению

Описанная методика выбора алгоритма разделения может быть примене-

на при расчете потенциальных технологических показателей, а также при реализации предварительного обогащения комплексных руд методом рентгенофлуоресцентной сепарации.

Направление будущих исследований

В дальнейшем необходимо продолжить исследования для руд, имеющих более сложный состав, таких, например, как полиметаллические руды.

Необходимо изучить другие виды алгоритмов сортировки, а также детально изучить влияние покусковых распределений содержаний отдельных компонентов на вид требуемого алгоритма сортировки.

Заключение

В результате исследований получены экспериментальные кривые разделения пробы двухкомпонентной медно-цинковой руды, полученные для разных алгоритмов сортировки: по предельному аналитическому параметру и по рентгеновскому комплексному параметру с различными весовыми коэффициентами.

По кривым разделения получены технологические показатели разделения для получения коллективных хвостов с различными ограничениями по обоим ценным компонентам.

Выявлено, что использование в R-алгоритме весовых коэффициентов (k при HZn отличен от нуля) для двухкомпонентной руды при отсутствии корреляции между ценными компонентами позволяет получить больший выход коллективных хвостов по сравнению с алгоритмом разделения, учитывающим только один из ценных компонентов, в рассмотренном случае медь, при одних и тех же ограничениях на содержание обоих ценных компонентов в хвостах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю. Экономическая эффективность предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 6. — С. 66–74. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-66-74.
2. Chelgani S. C., Neisiani A. Asimi. Dry mineral processing. Springer Nature Switzerland AG, 2022, Corrected publication 2023.
3. Пелевин А. Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 579–592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
4. Опалев А. С., Марчевская В. В. Разработка инновационных технологий обогащения полезных ископаемых Арктической зоны России // Горная промышленность. — 2023. — № 1. — С. 63–70. DOI: ORG/10.30686/1609-9192-2023-1-63-70.
5. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. — М.: Руда и металлы, 2007. — 952 с.
6. Вальщиков А. В., Литвиненко А. П., Делер М. Проект освоения Усинского месторождения марганца. Технология обогащения руды // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2011. — № 3. — С. 80–83.
7. Tsypin E. F., Entaltsev E. V., Shemyakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Y. O., Pestov V. V. Enrichment by X-ray radiometric separation // Steel in Translation. 2009, vol. 6, pp. 521–524.
8. Зверев В. В., Литвинцев Э. Г., Рябкин В. К., Гусев С. С., Кузнецова О. В., Глушко Т. В., Ратнер В. Б., Рябкина З. П. Радиометрическая сепарация как основной процесс в технологической схеме обогащения минерального сырья // Обогащение руд. — 2001. — № 5. — С. 3–6.
9. Li L., Li G., Li H., Li G., Zhang D., Klein B. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting // Minerals Engineering. 2018, vol. 121, pp. 129–136. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.02.023.
10. Федоров Ю. О., Кацер И. У., Корнев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. — 2005. — № 5. — С. 21–37.
11. 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.
12. Кобзев А. С. Радиометрическое обогащение минерального сырья. — М.: Изд-во «Горная книга», 2023. — 196 с.
13. Ермошкин Н. Н., Ермошкин Д. Н., Курманалиев К. З., Мансуров В. А. Рудоподготовка при потоке балансовой, эксплуатационной и товарной руды золоторудного месторождения Джамгыр // Горная промышленность. — 2023. — № 1. — С. 101–108. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-101-108.
14. Заболоцкий А. И., Нерущенко Е. В., Рассулов В. А. Результаты исследования применимости методов предварительного обогащения золотосодержащих руд на месторождениях Highland Gold // Рациональное освоение недр. — 2020. — № 4. — С. 64–70. DOI: 10.26121/RON.2020.57.68.008.
15. Veras M. M., Young A. S., Born C. R., Szewczuk A., Neto A. C. B., Petter C. O., Sampaio C. H. Affinity of dual energy X-ray transmission sensors on minerals bearing heavy rare earth elements // Minerals Engineering. 2020, vol. 147, article 106151.
16. Аксельрод Л. М., Турчин М. Ю., Назмиев М. И., Мануйлова Е. В., Галиханов И. И. Обогащение магнетита Саткинского месторождения рентгенотрансмиционным методом // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 8–12. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-6-8-12.
17. Лебедев А. Н., Кобзев А. С., Куличенко А. В. Сравнение эффективности обогащения бруситовой руды радиометрическими методами сепарации // Разведка и охрана недр. — 2021. — № 1. — С. 53–56.
18. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining — Past, present and future // Minerals. 2019, vol. 9, article 523. DOI: 10.3390/min9090523.
19. Газалеева Г. И. Методы улучшения качества асбеста. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. — 153 с.

20. Collier D., Dwyer F. B., Thompson R. L., Wulff E. Ore sorters for asbestos and scheelite / International Mineral Processing Congress. London, 1973. London, 1974, pp. 1007 – 1022.
21. Zhang Y. R. Assessment of dual-energy X-ray transmission image analysis process on sulphide ore and coal cases. University of British Columbia, 2023, 106 p.
22. Wang S., He L., Guo Y., Hu K., Li D., Zhao Y., Ma X. Dual-energy X-ray transmission identification method of multi-thickness coal and gangue based on SVM distance transformation // Fuel. 2024, vol. 356, article 129593. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129593.
23. Пелевин А. Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в повышенном магнитном поле // Черные металлы. — 2022. — № 1. — С. 31 – 36. DOI: 10.17580/chm.2022.01.04.
24. Петров С. В., Бороздин А. П., Головина Т. А., Шелухина Ю. С. Об опыте применения предварительной сепарации руды с применением современных сенсорных методик // Разведка и охрана недр. — 2021. — № 2. — С. 31 – 47.
25. 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.
26. Колесаев В. Б., Литвиненко В. Г., Култышев В. И. Комбинированная технология переработки бедных урановых руд // Горный журнал. — 2008. — № 8. — С. 50 – 53.
27. Шестаков В. В. Ядерно-геофизический экспресс-анализ транспортируемых руд и ресурсосберегающие технологии. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. — 111 с.
28. Peukert D., Xu C., Dowd P. A. Review of sensor-based sorting in mineral processing: The potential benefits of sensor fusion // Minerals. 2022, vol. 12, no. 11, article 1364. DOI: 10.3390/min12111364.
29. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Пестов В. В. Построение технологических схем предварительного обогащения многокомпонентных руд // Обогащение руд. — 2016. — № 5. — С. 8 – 13. DOI: 10.17580/or.2016.05.02.
30. Литвинцев Э. Г. Комплексование радиометрических методов при сепарации одно- и многокомпонентных руд // Обогащение руд. — 1984. — № 3. — С. 15 – 17. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Tsy-pin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Iu. Economic efficiency of preconcentration with X-ray fluorescence separation. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 6, pp. 66 – 74. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-66-74.
2. Chelgani S. C., Neisiani A. Asimi. *Dry mineral processing*. Springer Nature Switzerland AG, 2022, Corrected publication 2023.
3. Pelevin A. E. Iron ore beneficiation technologies in Russia and ways to improve their efficiency. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 579 – 592. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
4. Opalev A. S., Marchevskaya V. V. Development of innovative technologies of ore mineral resources concentration from the Russian Arctic zone. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 1, pp. 63 – 70. [In Russ]. DOI: ORG/10.30686/1609-9192-2023-1-63-70.
5. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. *Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopaemykh*. T. 1. [Mineral processing technology. Vol. 1], Moscow, Ruda i metally, 2007, 952 p.
6. Valshchikov A. V., Litvinenko A. P., Dehler M. The Usinskoye manganese ore deposit project. Ore beneficiation process. *Mineral resources of Russia. Economics & management*. 2011, no. 3, pp. 80 – 83. [In Russ].
7. Tsy-pin E. F., Entaltsev E. V., Shemyakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Y. O., Pestov V. V. Enrichment by X-ray radiometric separation. *Steel in Translation*. 2009, vol. 6, pp. 521 – 524.
8. Zverev V. V., Litvintsev E. G., Ryabkin V. K., Gusev S. S., Kuznetsiva O. V., Glushko T. V., Ratner V. B., Ryabkina Z. P. Radiometric separation as the main process in the technological scheme of mineral processing. *Obogashchenie Rud*. 2001, no. 5, pp. 3 – 6. [In Russ].
9. Li L., Li G., Li H., Li G., Zhang D., Klein B. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 121, pp. 129 – 136. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.02.023.

10. Fedorov Yu. O., Katsler 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. *Minerals and Mining Engineering*. 2005, no. 5, pp. 21 – 37. [In Russ].
11. Sanakulov K. S., Rudnev S. V., Kantsel' A. V. About the possibility of mining the Uchkulach deposit using the technology of X-ray radiometric processing of lead-zinc ores. *Mining Bulletin of Uzbekistan*. 2011, no. 1(44), pp. 17 – 20. [In Russ].
12. Kobzev A. S. *Radiometricheskoe obogashchenie mineral'nogo syr'ya* [Kobzev A. S. Radiometric beneficiation of mineral raw materials]. Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2023, 196 p.
13. Ermoshkin N. N., Ermoshkin D. N., Kurmanaliev K. Z., Mansurov V. A. Ore dressing for the balance, mined and merchantable ores at the Jamgyr gold deposit. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 1, pp. 101 – 108. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-101-108.
14. Zabolotsky A. I., Nerushchenko E. V., Results of research on the applicability of pre-enrichment methods for gold ores from Highland Gold mining ltd deposits. *Mineral mining & conservation*. 2020, no. 4, pp. 64 – 70. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2020.57.68.008.
15. Veras M. M., Young A. S., Born C. R., Szewczuk A., Neto A. C. B., Petter C. O., Sampaio C. H. Affinity of dual energy X-ray transmission sensors on minerals bearing heavy rare earth elements. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 147, article 106151.
16. Aksel'rod L. M., Turchin M. Y., Nazmiev M. I., Manuilova E. V., Galikhanov I. I. Satkin's magnesite concentration by means of X-ray transmission method. *New Refractories*. 2016, no. 6, pp. 8 – 12. [In Russ]. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-6-8-12.
17. Lebedev A. N., Kobzev A. S., Kulichenko A. V. Comparison of efficiency of brusite ore concentration by radiometric separation methods. *Prospect & protection of mineral resources*. 2021, no. 1, pp. 53 – 56. [In Russ].
18. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining – Past, present and future. *Minerals*. 2019, vol. 9, article 523. DOI: 10.3390/min9090523.
19. Gazaleeva G. I. *Metody uluchsheniya kachestva asbesta* [Methods for improving the quality of asbestos], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2005, 153 p.
20. Collier D., Dwyer F. B., Thompson R. L., Wulff E. Ore sorters for asbestos and scheelite. *International Mineral Processing Congress*. London, 1973. London, 1974, pp. 1007 – 1022.
21. Zhang Y. R. *Assessment of dual-energy X-ray transmission image analysis process on sulphide ore and coal cases*. University of British Columbia, 2023, 106 p.
22. Wang S., He L., Guo Y., Hu K., Li D., Zhao Y., Ma X. Dual-energy X-ray transmission identification method of multi-thickness coal and gangue based on SVM distance transformation. *Fuel*. 2024, vol. 356, article 129593. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129593.
23. Pelevin A. E. Increasing the efficiency of iron ore raw materials beneficiation by separation in an increased magnetic field. *Chernye metally*. 2022, no. 1, pp. 31 – 36. DOI: 10.17580/chm.2022.01.04.
24. Petrov S. V., Borozdin A. P., Golovina T. A., Shelukhina Yu. S. Experience of application of ore preconcentration with the implementation of modern sensor techniques. *Prospect & protection of mineral resources*. 2021, no. 2, pp. 31 – 47. [In Russ].
25. 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].
26. Kolesaev V. B., Litvinenko V. G., Kultyshev V. I. Combined technology for processing of poor uranium ores. *Gornyi Zhurnal*. 2008, no. 8, pp. 50 – 53. [In Russ].
27. Shestakov V. V. *Yaderno-geofizicheskiy ekspress-analiz transportiruemyykh rud i resursosberegayushchie tekhnologii* [Nuclear and geophysical express analysis of transported ores and resource-saving technologies], Sverdlovsk, 1987, 111 p.
28. Peukert D., Xu C., Dowd P. A. Review of sensor-based sorting in mineral processing: The potential benefits of sensor fusion. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 11, article 1364. DOI: 10.3390/min12111364.
29. Tsy-pin E. F., Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Pestov V. V. Development of flow sheets for pre-concentration of multi-component complex ores. *Obogashchenie Rud*. 2016, no. 5, pp. 8 – 13. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.05.02.
30. Litvintsev E. G. Integration of radiometric methods in the separation of single and multicomponent ores. *Obogashchenie Rud*. 1984, no. 3, pp. 15 – 17. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Цыпин Евгений Федорович*¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: tsipin.e@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3921-2695,
Ефремова Татьяна Александровна — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
АО «Уралмеханобр»,
e-mail: efremova_ta@umbr.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9917-6676,
*Овчинникова Татьяна Юрьевна*¹ — канд. техн. наук,
доцент, доцент,
e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7000-9295,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Овчинникова Т.Ю., e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.F. Tsypin*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: tsipin.e@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3921-2695,
T.A. Efremova, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, JSC «Uralmekhanobr»,
620144, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: efremova_ta@umbr.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9917-6676,
*T.Yu. Ovchinnikova*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Assistant Professor,
e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7000-9295,

¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: I.O. Familia, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 16.07.2024; получена после рецензии 28.10.2024; принята к печати 10.12.2024.
Received by the editors 16.07.2024; received after the review 28.10.2024; accepted for printing 10.12.2024.

