

ПРОГНОЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ ПО ФРАКЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РУДЫ

Е. Ф. Цыпин¹, Т. Ю. Овчинникова¹, Т. А. Ефремова¹, С. В. Зиятдинов¹

¹ ФБГОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, 620144, РФ,
office@ursmu.ru

² АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, 620144, РФ, umbr@umbr.ru

Аннотация: В основе прогноза обогатимости любого минерального сырья лежат фракционные характеристики, позволяющие оценить предельную обогатимость выбранным методом обогащения. Для информационных методов обогащения это особенно проявляется при использовании поверхностных методов получения информации, такого, например, как рентгенофлуоресцентная сепарация. В этом случае фракционные характеристики имеют свойства, связанные с геометрией измерения поверхностных свойств кусков. В работе выполнен анализ покусковой минеральной неоднородности на кусковой пробе медной руды. Выявлено, что неоднородность поверхностной минерализации кусков увеличивается по мере роста значения аналитического параметра. Для оценки меры неоднородности более информативными являются показатели абсолютных значений, такие, например, как среднее квадратическое отклонение и сумма модулей отклонения от среднего значения. Установлено, что частные реализации отличаются друг от друга и требуют усреднения функции плотности распределения вероятности аналитического параметра, который используется в качестве признака разделения, для последующего прогноза обогатимости. Получены экспериментальные частные и усреднённые фракционные характеристики для изученной пробы медной руды. Для принятых границ разделения определены идеальные технологические показатели предварительного обогащения с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации, сделан вывод о потенциальной обогатимости изученной руды методом рентгенофлуоресцентной сепарации.

Ключевые слова: предварительное обогащение; рентгенофлуоресцентная сепарация (РФС); характер минерализации; мера минеральной неоднородности; фракционные характеристики; плотность распределения вероятности; аналитический параметр; прогноз технологических показателей; медная руда.

Для цитирования: Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Зиятдинов С. В. Прогноз технологических показателей рентгенофлуоресцентной сепарации по фракционным характеристикам руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 1-1. — С. 87–101. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_87.

Forecast of technological indicators of X-ray fluorescence separation by ore fractional characteristics

E. F. Tsyпин¹, T. Yu. Ovchinnikova¹, T. A. Efremova², S. V. Ziyatdinov¹

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ural State Mining University",
30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, 620144, Russia, office@ursmu.ru

² JSC "Uralmekhanobr", 87 Khokhryakova str., Yekaterinburg, Russia, 620144, umbr@umbr.ru

Abstract: The forecast of the enrichment of any mineral raw materials is based on fractional characteristics that allow us to estimate the maximum enrichment by the chosen method of enrichment. This is especially evident for sensor-based sorting methods when using surface methods of obtaining information, such as, for example, X-ray fluorescence separation. In this case, the fractional characteristics have properties related to the measurement geometry of the surface properties of the lumps. The paper analyzes the lump mineral nonuniformity on a lump sample of copper ore. It is revealed that the nonuniformity of the surface mineralization of the lumps increases as the value of the analytical parameter increases too. To assess the measure of nonuniformity, indicators of absolute values are more informative, such as, for example, the mean square deviation and the sum of the modulus of deviation from the mean value. It is established that particular implementations differ from each other and require averaging of the probability distribution density function of the analytical parameter, which is used as a sign of separation, for the subsequent prediction of enrichment. Experimental partial and averaged fractional characteristics for the studied copper ore sample were obtained. For the accepted separation boundaries, the ideal technological parameters of pre-concentration using X-ray fluorescence separation were determined, and a conclusion was made about the potential enrichment of the ore studied by X-ray fluorescence separation.

Key words: preliminary ore dressing, X-ray fluorescence separation (XRF); mineralization type; measure of mineral nonuniformity; fractional characteristics; probability distribution density; analytical parameter; forecast of technological indicators; copper ore.

For citation: Tsy-pin E. F., Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Ziyatdinov S. V. Forecast of technological indicators of X-ray fluorescence separation by ore fractional characteristics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):87–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_87.

Введение

Предварительная концентрация минерального сырья с использованием информационных методов обогащения применяется в настоящее время при переработке разнообразных видов полезных ископаемых [1].

Предварительному обогащению с применением различных информационных методов подвергают урановые [2, 3], золотосодержащие [4, 5], руды чёрных металлов. Широкое применение находят информационные методы и при предварительном обогащении таких руд цветных и редких металлов, как: свинцово-цинковые [6], медно-никелевые [7], медные [8], цирконсодержащие [9], литийсодержащие [10, 11], оловосодержащие [12], вольфрамсодержащие [13]. Кроме того, есть примеры успешного применения этих методов при обогащении кварцевого сырья [14], а также других видов неметаллических полезных ископаемых [15, 16].

Актуальность включения предварительного обогащения в технологию переработки сырья для горно-обогачительных, горно-химических и горно-металлургических комбинатов вызвана снижением содержаний ценных компонентов в добываемой горной массе, с завершением отработки базовых месторождений, вовлечением в переработку минерального сырья удалённых от комбинатов месторождений, требующим значительного увеличения транспортных затрат [17].

Наряду с гравитационными [16, 18] и магнитными [16, 19, 20] приёмами предварительной концентрации широкое распространение получили информационные методы сепарации полезных ископаемых [16, 21, 22], в которых могут использоваться различия минералов в таких свойствах, как естественная радиоактивность [3], элементный состав [16, 22], люминесценция [16, 23], теплопроводность [24,

25], оптические характеристики [5, 26] и многие другие.

Большие информативные возможности и универсальность по сравнению с другими имеет рентгенофлуоресцентный метод [22].

Рентгенофлуоресцентный метод позволяет определить элементный состав контролируемого вещества, благодаря чему появляется возможность вести сортировку многокомпонентных руд, используя специальные алгоритмы принятия решения с учётом содержания нескольких элементов, однако данный метод имеет ряд особенностей, влияющих на обогатимость сырья.

Рентгенофлуоресцентный метод сепарации относится к методам, использующим поверхностные признаки разделения, поскольку в нём информация об элементном составе получают от внешнего слоя куска глубиной в доли миллиметра.

Этот фактор является существенным при оценке потенциальных технологических показателей разделения сырья данным методом, поскольку показатели будут зависеть от характера объёмной минерализации кусков и от полноты контроля поверхности кусков.

В качестве аналитического параметра, по величине которого принимается решение о разделении кусков, используют параметр H , представляющий спектральное отношение числа импульсов в характеристической области вторичного рентгеновского излучения элемента к числу импульсов в области рассеянного излучения [22].

Влияние этих условий на эффективность разделения рассмотрено ранее при математическом моделировании процесса [27, 28] и при экспериментальном изучении процесса рентгенофлуоресцентной сепарации на искусственных образцах сортируемого материала [28]. Исследованиями

выявлены определённые закономерности влияния характера минерализации модельных и искусственных образцов на эффективность сепарации, которые могут быть использованы при совершенствовании рентгенофлуоресцентных сепараторов.

Более достоверную оценку влияния характера специфической минерализации кусков реальных руд может дать изучение показателей сепарации на выборках характерных по виду минерализации кусков обогащаемого сырья при их неоднократном прохождении через измерительную зону сепаратора с последующим усреднением фракционной характеристики.

Целью исследования является получение для отдельных реализаций прохождения частиц через сепаратор покусковой плотности распределения вероятностей аналитического параметра, представляющей собой важнейшую фракционную характеристику материала, и аналогичной характеристики для усреднённых данных, а также использование этих характеристик для прогноза технологических показателей обогащения при идеальном разделении изученной пробы руды по граничным значениям аналитического параметра.

В качестве меры минеральной неоднородности контролируемой поверхности кусков рассмотрены такие показатели, как значение коэффициента вариации V_H аналитического параметра H , по которому осуществляется принятие решения об удалении куска из потока, среднее квадратическое отклонение аналитического параметра $H - S_H$, а также сумма модулей отклонения от среднего значения, отнесённая к среднему значению для N измерений аналитического параметра каждого куска — T_H . Показатели V_H и S_H вычислены по стандартным формулам, пока-

затель меры неоднородности T_H рассчитан как

$$T_H = \sum_{j=1}^N |H_j - H_{cpN}| / H_{cpN}, \quad (1)$$

где H_j — значение аналитического параметра в j -м измерении рентгеновских характеристик куска, усл. ед., H_{cpN} — среднее значение аналитического параметра куска, полученное для N измерений, усл. ед.

Методика исследований

Для изучения влияния характера минерализации кусков на эффективность сепарации на пробе кусковой руды проведены опыты, включавшие в себя экспериментальное определение аналитического параметра, связанного с поверхностным содержанием компонента. Проба кускового материала представлена кусками крупностью -50+25 мм окисленной медной руды, в кусках пробы визуально отмечен различный характер минерализации. Среднее содержание меди в пробе равно 1,24%.

Реализация процесса сепарации выполнена с применением лабораторного рентгенофлуоресцентного сепаратора СРФ-100Л. Каждый из кусков пробы был неоднократно пропущен через измерительную систему сепаратора, при этом происходило измерение аналитического параметра в динамических условиях.

В качестве аналитического параметра H принято спектральное отношение числа импульсов в характеристической области вторичного рентгеновского излучения меди (N_{Cu}) к числу импульсов в области рассеянного излучения (N_s):

$$H = N_{Cu} / N_s.$$

Для пробы, состоящей из 55 кусков, общее число измерений составило более 1000 (20 измерений на каждый кусок).

Полученные значения частных измерений аналитического параметра каждого куска обработаны с применением формул математической статистики. Для каждого куска рассчитаны: среднее значение аналитического параметра для N измерений — H_{cp} ; коэффициент вариации — V_H ; среднее квадратическое отклонение — S_H . По формуле (1) рассчитан показатель меры неоднородности T_H . По рассчитанным показателям проведена оценка неоднородности минерализации контролируемой поверхности кусков (рис. 1, табл. 1).

Для кусков пробы изученной руды экспериментально определена зависимость между массовой долей меди и аналитическим параметром, которая затем использована для прогноза технологических показателей разделения.

Рассчитаны и построены покусковые плотности распределения вероятности среднего значения аналитического параметра $w(H_i)$ и массовой доли меди $\alpha(H_i)$ для пробы кускового материала (рис. 2).

Полученные фракционные характеристики в виде покусковой плотности распределения вероятности аналитического параметра $w(H_i)$ и зависимости содержания компонента от значения аналитического параметра $\alpha(H_i)$ являются основой для прогноза технологических показателей разделения изученной пробы.

Прогнозируемые технологические показатели разделения при использовании идеального сепаратора могут быть определены по формулам в табл. 1.

Для случая идеального разделения (идеальный сепаратор) вероятность извлечения может быть рассчитана по алгоритму

выход продукта:

хвосты

$$\gamma_x = \sum_{i=1}^l w_u(H_i) \cdot \Delta H_i; \quad (2)$$

концентрат

$$\gamma_k = \sum_{i=l+1}^n w_u(H_i) \cdot \Delta H_i; \quad (3)$$

массовая доля компонента в продукте:

хвосты

$$\vartheta = \gamma_x^{-1} \sum_{i=1}^l w_u(H_i) \cdot \alpha(H_i) \cdot \Delta H_i; \quad (4)$$

концентрат

$$\beta = \gamma_k^{-1} \sum_{i=l+1}^n w_u(H_i) \cdot \alpha(H_i) \cdot \Delta H_i, \quad (5)$$

где $w_u(H_i) = \gamma_i / \Delta H_i$ – плотность распределения вероятности аналитического параметра, усл. ед.⁻¹; ΔH_i – ширина интервала фракции по аналитическому параметру, усл. ед.; i – количество кусков пробы, имеющих значение аналитического параметра ниже граничного значения $H_{гр}$; n – общее число кусков пробы; $\alpha(H_i)$ – экспериментально полученная α -функция для кусков пробы.

А при известной сепарационной характеристике аппарата, учитывающей несовершенство процесса разделения, формулы прогноза технологических показателей будут иметь следующий вид:

выход продукта:

хвосты

$$\gamma_x = \sum_{i=1}^n w_u(H_i) \cdot \varepsilon_x(H_i) \cdot \Delta H_i; \quad (6)$$

концентрат

$$\gamma_k = \sum_{i=1}^n w_u(H_i) \cdot \varepsilon_k(H_i) \cdot \Delta H_i; \quad (7)$$

массовая доля компонента в продукте:

хвосты

$$\vartheta = \gamma_x^{-1} \sum_{i=1}^n w_u(H_i) \cdot \alpha(H_i) \cdot \varepsilon_x(H_i) \cdot \Delta H_i; \quad (8)$$

концентрат

$$\beta = \gamma_k^{-1} \sum_{i=1}^n w_u(H_i) \cdot \alpha(H_i) \cdot \varepsilon_k(H_i) \cdot \Delta H_i, \quad (9)$$

где $\varepsilon_x(H_i), \varepsilon_k(H_i)$ – вероятность извлечения куска в хвосты и концентрат, д. ед.

$$\varepsilon_x(H_i) = \begin{cases} 1 & \text{при } H_i > H_{zp}; \\ 0,5 & \text{при } H_i = H_{zp}; \\ 0 & \text{при } H_i < H_{zp}. \end{cases} \quad (10)$$

ных границ разделения или заданных показаний по качеству продуктов разделения можно осуществлять с использованием кривых разделения, построенных на основе рассчитанных по формулам (2)–(5) фракционных составов исходного и накопленных продуктов.

Также прогноз технологических показателей разделения для различ-

Результаты и их обсуждение

Для поверхностных признаков, к которым относится аналитический параметр, используемый при рентгенофлуоресцентной сепарации, важно оценивать меру минеральной неоднородности контролируемой поверхности. Для оценки неоднородности получаемых показателей использованы такие показатели меры неоднородности, как: коэффициент вариации аналитического параметра $H - V_H$, среднее квадратическое отклонение аналитического параметра $H - S_H$, и показатель неоднородности — T_H . Последний рассчитан по формуле (1).

На рис. 1 приведены зависимости показателей неоднородности V_H и S_H от среднего значения аналитического параметра (рис. 1, а, б), дополнительно рассчитаны средние значения показателей V_H и S_H на выделенных диапазонах по значению H . Как показывает рис. 1, а, коэффициент вариации среднего значения меняется в диапазоне от 20 до 122%, что свидетельствует о значительной вариации поверхностной минерализации для пробы в целом. Также можно отметить наибольшую вариацию в диапазоне малых значений аналитического параметра (0,05–0,125 усл. ед.). Отмеченные факты указывают на то, что коэффициент вариации по среднему значению аналитического параметра является малоинформативным.

Зависимость показателя меры неоднородности S_H от среднего значения аналитического параметра (рис. 1, б), напротив, демонстрирует более тесную связь, что выражается видом зависимости — близкой к прямой. Наблюдаемый тренд показывает, что неоднородность поверхностной минерализации возрастает по мере увеличения среднего значения аналитического параметра. Можно сделать вывод о том, что абсо-

лютные отклонения от среднего значения являются более информативными для оценки неоднородности.

Как показывает рис. 1, в, связь между показателями неоднородности T_H и V_H является довольно тесной, коэффициент корреляции двух этих показателей равен 0,9703. Это свидетельствует о том, что показатель суммы абсолютных отклонений от среднего значения, полученного усреднением нескольких реализаций для одного куска, так же, как и коэффициент вариации, не может являться оценкой меры минеральной неоднородности поверхности.

Так как каждый кусок пропущен через измерительную систему неоднократно, то на следующем этапе исследований были рассчитаны и построены фракционные характеристики (рис. 2) для изученной пробы медной руды в вариантах частных реализаций (серия штриховых линий 2) и по усреднённым значениям аналитического параметра, рассчитанных по результатам всех реализаций (сплошная линия 1). Частная реализация, или «прогонка» — это имитация единичного опыта по сортировке всех кусков пробы руды в динамических условиях. Так как каждый кусок пробы был подвергнут измерению аналитического параметра H неоднократно (20 раз), необходимо усреднить эти полученные значения по результатам всех «прогонок».

Построенные фракционные характеристики представляют собой покусковые плотности распределения вероятности по признаку разделения. Зависимости имеют выраженный правоасимметричный вид, что характерно для исходной пробы рядовой и бедной руды. Выявлено, что плотности распределения вероятности, рассчитанные по усреднённым значениям всех реализаций (см. рис. 2, 1) и построенные по результатам одной «прогонки» част-

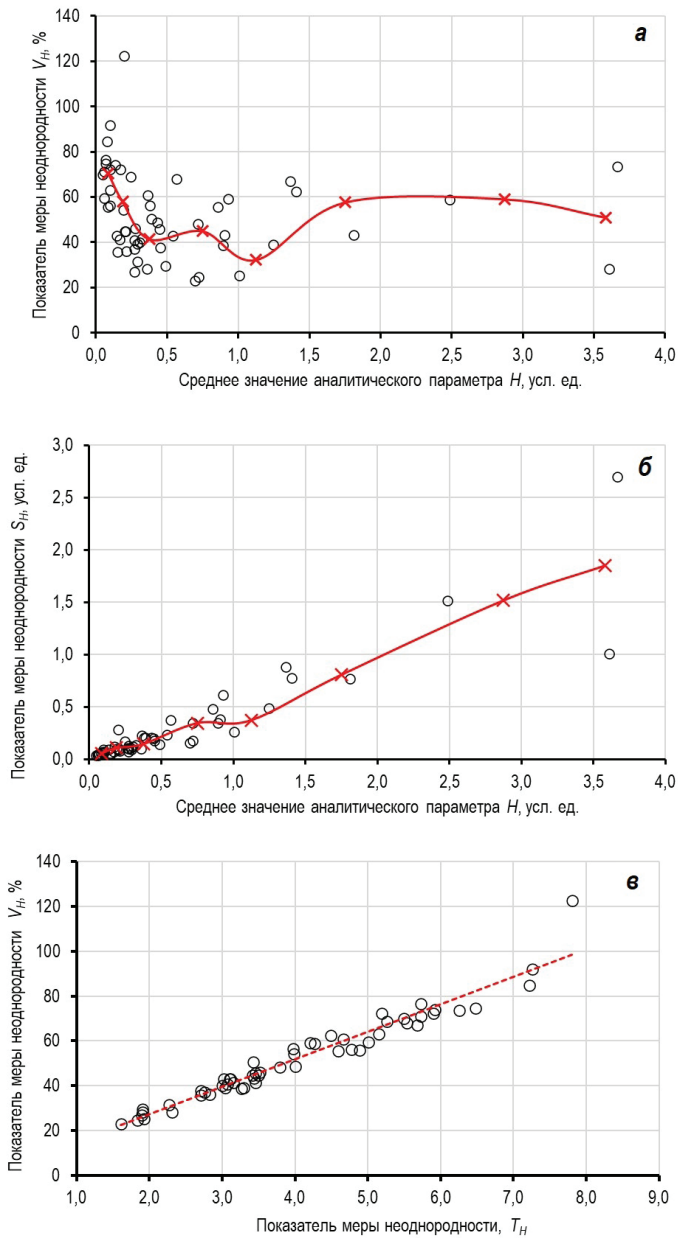


Рис. 1. Показатели меры неоднородности минерализации контролируемой поверхности: а – зависимость коэффициента вариации от среднего значения аналитического параметра H ; б – зависимость среднего квадратического отклонения от среднего значения аналитического параметра H ; в – связь между показателями меры неоднородности V_H и T_H

Fig. 1. Nonuniformity measure indicators of the controlled surface mineralization: а – dependence of the variation coefficient on the average value of the analytical parameter H ; б – dependence of the mean square deviation on the average value of the analytical parameter H ; в – correlation between the measure of nonuniformity indicators V_H and T_H

Таблица 1

Сравнение различных показателей меры неоднородности
Comparison of various indicators of the nonuniformity measure

Диапазон по значению H , усл. ед.	Показатель меры неоднородности		
	А	Б	В
	V_{H_i} , %	S_{H_i} , усл. ед.	T_H
0,05–0,125	70,48	0,05	5,69
0,125–0,25	57,95	0,11	4,26
0,25–0,50	41,28	0,15	3,13
0,50–1,00	44,87	0,35	3,51
1,00–1,25	32,15	0,37	2,48
1,25–2,25	57,57	0,81	4,42
2,25–3,50	58,98	1,52	4,27
3,50–3,67	50,90	1,85	4,28

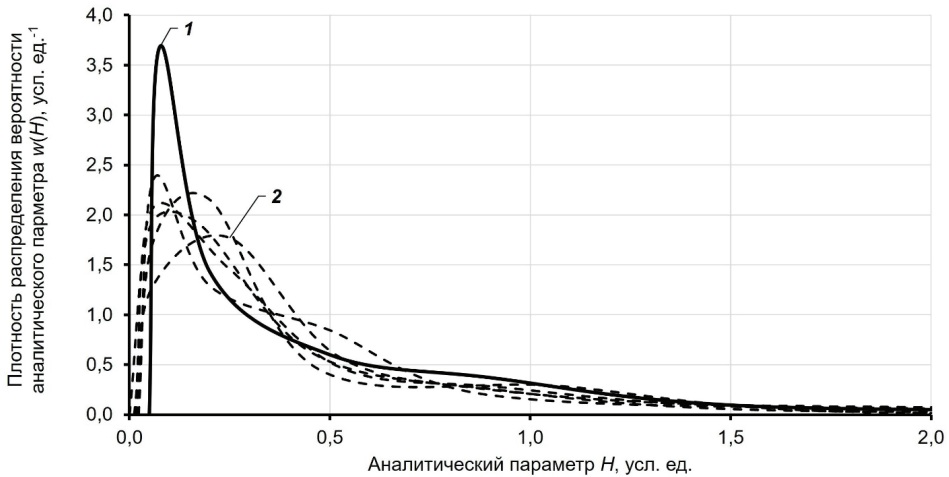


Рис. 2. Плотности распределения вероятности аналитического параметра, полученные при усреднении значений всех реализаций (1) для кусков пробы и в частных реализациях (2)

Fig. 2. Probability distribution densities of analytical parameter obtained by averaging the values of all implementations (1) for sample lumps and in particular implementations

ной реализации (см. рис. 2, 2), различаются. Так, например, частная реализация может одновременно как занижать, так и завышать значения признака разделения по сравнению с усреднёнными значениями, об этом свидетельствует вид частных фракционных характеристик, имеющих более широкие диапазоны изменения и меньшую высоту в точке экстремума. Этот факт объясняется неоднородностью поверхностной минерализации кусков, а также тем, что

в частной реализации кусок измеряется однократно, только с одной стороны, а при усреднении результатов имитируется многосторонний осмотр, что увеличивает полноту получаемой информации о поверхности куска. Это факт позволяет рекомендовать при изучении обогатимости рентгенофлуоресцентным методом проводить не менее двух-трёх опытов в динамических условиях, с последующим усреднением полученных значений аналитического параметра

тра. Последующий прогноз технологических показателей разделения также рекомендуется осуществлять с использованием фракционных характеристик, построенных по усреднённым значениям аналитического параметра.

В табл. 2 для изученной пробы руды приведены фракционные составы исходного и накопленных продуктов, рассчитанные для усреднённых значений признака разделения с применением экспериментально полученной зависимости массовой доли меди от аналитического параметра. На рис. 3 приведены кривые разделения, рассчитанные с применением формул (2)–(5).

Кривые обогатимости являются инструментом для прогноза технологических показателей разделения, варианты использования которого достаточно гибки. Так, задавая различные значения границы разделения $H_{гр}$ по аналитическому параметру, можно определить идеальные технологические показатели, такие как выход целевого продукта и массовая доля компонента в нём.

Целевым продуктом для предварительного обогащения чаще всего явля-

ются хвосты, выход которых должен стремиться к максимально возможному при наложенных ограничениях на качество либо на потери компонента этим продуктом.

Для изученной пробы руды сделан прогноз получаемых технологических показателей по хвостам при $H_{гр} = 0,1$ и $H_{гр} = 0,3$ усл. ед. В первом случае выход хвостов составил 0,1838 д. ед. при содержании в этих хвостах меди 0,25%, при этом потери меди составили 3,7%, для второго граничного значения выход хвостов 0,4711 д. ед., содержание меди 0,38%, потери меди 14,4%. При потенциальном выходе хвостов более 0,2 д. ед. и массовой доле меди в них на уровне отвальных хвостов, получаемых при флотации, $\vartheta = 0,2-0,3\%$, применение предварительного обогащения в крупнокусковом виде с применением рентгенофлуоресцентной сепарации является целесообразным [17, 21]. Для изученной руды можно предположить, что разделение при границе по величине аналитического параметра в диапазоне $H_{гр}=0,1-0,3$ усл. ед. позволит достичь приемлемых показателей обогащения.

Таблица 2

Фракционный состав исходного и накопленных продуктов
Fractional composition of the feed and accumulated products

Границы фракций H , усл. ед.	Элементарные фракции			Накопленные фракции				Извлечение меди в накопленные хвосты (потери меди), %
	H , усл. ед.	выход, д. ед.	αCu , %	концентрат		хвосты		
				выход γK , д. ед.	βCu , %	выход γK , д. ед.	ϑCu , %	
0,05–0,1	0,0750	0,1838	0,25	1,0000	1,24	0,1838	0,25	3,7
0,1–0,3	0,2239	0,2873	0,46	0,8162	1,46	0,4711	0,38	14,4
0,3–0,7	0,4499	0,2402	0,80	0,5289	2,00	0,7113	0,52	29,9
0,7–1,1	0,8514	0,1485	1,57	0,2887	3,00	0,8598	0,70	48,8
1,1–2,0	1,4500	0,0777	2,40	0,1402	4,52	0,9375	0,84	63,9
2–3,67	3,3246	0,0625	7,15	0,0625	7,15	1,0000	1,24	100,0
Итого	0,6330	1,0000	1,24	–	–	–	–	–

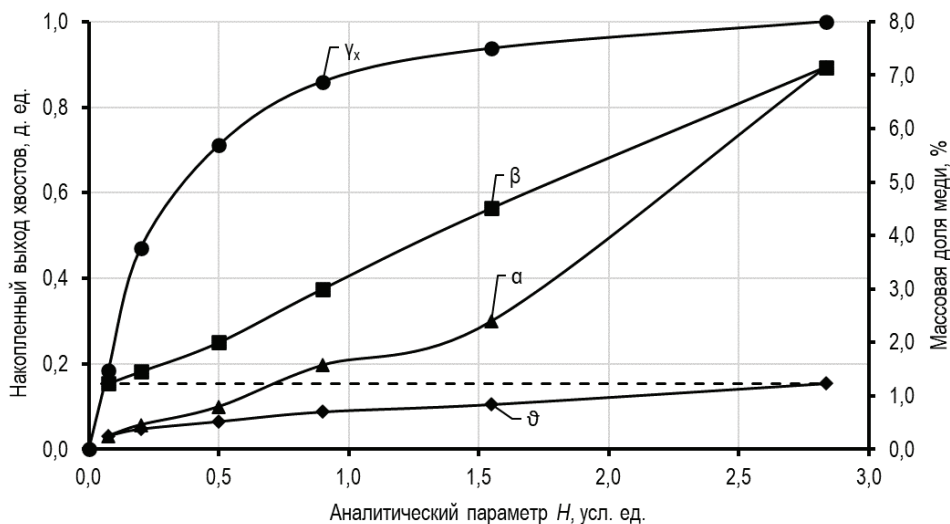


Рис. 3. Кривые разделения: γ_x — выход накопленных хвостов; α — кривая элементарных фракций; ϑ — кривая накопленных хвостов; β — кривая накопленного концентрата
 Fig. 3. Separation curves: γ_x — output of accumulated tails; α — the curve of elementary fractions; ϑ — the curve of accumulated tails; β — the curve of accumulated concentrate

Однако следует помнить, что полученные по кривым разделения показатели являются идеальными и для прогноза реальных показателей следует учитывать сепарационную характеристику аппарата.

Предложения по практическому применению

Методика проведения исследований может быть применена при изучении обогатимости кусковых проб различных видов руд методом рентгенофлуоресцентной сепарации. Полученные при этом фракционные характеристики можно широко применять как для прогноза технологических показателей разделения, так и для оценки методом рентгенофлуоресцентной сепарации потенциальной обогатимости руды в целом.

Направление будущих исследований

В дальнейшем необходимо изучить влияние сепарационной характери-

стики аппарата, рентгенофлуоресцентного сепаратора, на получаемые технологические показатели разделения, с целью прогноза показателей, максимально приближенных к получаемым в реальных условиях сортировки в промышленных аппаратах подобного типа.

Заключение

Исследованиями выявлено, что при оценке минеральной неоднородности информативным показателем является среднее квадратическое отклонение аналитического параметра.

Рассчитаны и построены фракционные характеристики для кусковой пробы медной руды, представляющие собой плотности распределения вероятности аналитического параметра для единичных опытов по сортировке частных реализаций и по усредненным значениям. Вид характеристик позволил сделать вывод о необходимости проведения нескольких опытов по сортировке кусков пробы для увеличения

полноты получаемой информации о поверхности куска.

Получены экспериментальные кривые разделения для пробы медной руды, выполнен прогноз предельных технологических показателей обогащения методом рентгенофлуоресцентной сепарации для двух границ разделения по величине аналитического параметра. Полученные технологические показатели позволяют судить о возможности потенциального применения рентгенофлуоресцентной сепарации для целей предварительного обогащения изученной руды.

Вклад авторов

Цыпин Е. Ф. — генерация идеи исследования; анализ результатов исследования; написание текста статьи.

Овчинникова Т. Ю. — постановка задачи исследования; проведение экспериментов; анализ результатов исследования и подготовка данных; написание текста статьи.

Ефремова Т. А. — проведение экспериментов; получение данных для анализа.

Зиятдинов С. В. — проведение экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. — М.: Недра, 1984. — 208 с.

2. 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.

3. Култышев В. И., Колесаев В. Б., Литвиненко В. Г., Брюховецкий О. С. Повышение эффективности подземной разработки урановых месторождений. — М.: Изд-во МГИУ, 2007. — 212 с.

4. Рассулов В. А., Нерущенко Е. В. Лазерно-фотометрическая кусковая сепарация золотосодержащей руды // Обогащение руд. — 2020. — № 5. — С. 16–22. DOI: 10.17580/or.2020.05.03.

5. Заблоцкий 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.

6. 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.

7. Burdakova E. A., Bragin V. I., Usmanova N. F., Vashlaev A. O., D'yachenko L. E., Lesnikova L. S., Fertikov A. I. Radiometric separation in grinding circuit of copper–nickel ore processing // Journal of Mining Science. 2019, vol. 55, iss. 5, pp. 824–831. DOI: 10.1134/S1062739119056197.

8. 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.

9. Mikysek P., Trojek T., Mészárosová N., Adamovič J., Slobodník M. X-ray fluorescence mapping as a first-hand tool in disseminated ore assessment: sandstone-hosted U–Zr mineralization // Minerals Engineering. 2019, vol. 141. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105840.

10. Priscila Maria Esteves Brandão, Camila Menezes Senna, Lucas Barreto Napoli, Edwardes Antônio Dias Junior, Vinicius Souto Moraes Reis. Applicability of sensor based

sorting technology for processing lithium in pegmatites // Brazilian Journal of Development, Curitiba. 2023, vol. 9, no. 3, pp. 12504–12515. DOI: 10.34117/bjdv9n3–232.

11. *Rui Sousa, Aurora Futuro, António Fiúza, Mário Machado Leite*. Pre-concentration at crushing sizes for low-grade ores processing – Ore macro texture characterization and liberation assessment // Minerals Engineering. 2020, vol. 147, 106156. DOI.org/10.1016/j.mineng.2019.106156.

12. *Robben C., Condiri P., Pinto A., Machaca R., Takala A.* X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine // Minerals Engineering. 2020, vol. 145, 105870. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105870.

13. *Шенета Е. Д., Саматова Л. А., Воронова О. В.* Перспективные направления развития технологий обогащения вольфрамсодержащих руд и техногенных образований // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 67–71. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.13.

14. *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.

15. *Bellusci N., Taylor P. R., Spiller D. E., Braman V.* Coarse Beneficiation of Trona Ore by Sensor-Based Sorting // Mining, Metallurgy & Exploration. 2022, vol. 39, pp. 2179–2185. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00665-2>.

16. *Chelgani S. C., Neisiani A.* Asimi. Dry Mineral Processing. Springer Nature Switzerland AG 2022, corrected publication 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93750-8_7.

17. *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.

18. *Бочаров В. А., Игнаткина В. А.* Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. – М.: Руда и металлы, 2007. – 952 с.

19. *Пелевин А. Е.* Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в повышенном магнитном поле // Чёрные металлы. – 2022. – № 1. – С. 31–36. DOI: 10.17580/chm.2022.01.04.

20. *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.

21. *Gleeson D.* Preceding processing // International Mining. March, 2019, pp. 82–87.

22. *Fedorov Yu. O., Kulikov V. I., Dementiev V. E., Voiloshnikov G. I.* Preconcentration of ores as a major activity of JSC IRGIREDMET // IMPC 2018–29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 967–978.

23. *Терещенко С. В., Павлишина Д. Н.* Рентгенолюминесцентная сепарация бедных апатитсодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С. 130–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-130-137.

24. Патент РФ № 2326738. Способ термографической кусковой сепарации сырья (варианты) и устройство для его осуществления (варианты) / В. М. Волошин, В. Ю. Зубкевич. Заявл. 03.06.2004. Опубл. 20.06.2008.

25. Патент РФ № RU 2546702 С1. Способ сепарации алмазосодержащих смесей минералов / П. П. Шарин, М. П. Лебедев, Р. Г. Ноговицын, А. М. Тимофеев. Номер заявки: 2014112683/03. Дата регистрации: 01.04.2014. Дата публикации: 10.04.2015.

26. *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.

27. *Цыпин Е. Ф., Никифоров Д. В.* Предельная обогатимость и возможности её формирования // Известия вузов. Горный журнал. – 2001. – № 4–5. – С. 21–33.

28. Овчинникова Т. Ю., Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Аринов К. Н. Взаимосвязь поверхностного и объёмного содержаний компонента в кусках с различной минерализацией // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–1. — С. 139–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_139.

REFERENCES

1. Tikhonov O. N. Regularities of effective minerals separation in the processes of mineral dressing. Moskva: Nedra, 1984. 208 p. [In Russ].

2. Tatarnikov A. P., Asonova N. I., Balkina I. G., Naumov M. E., Konovalov G. N., Voevodin I. V. Modern technologies and equipment for radiometric concentration of uranium ores. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*, 2007, no. 2, pp. 85–87. [In Russ].

3. Kultyshev V. I., Kolesaev V. B., Litvinenko V. G., Brukhovetsky O. S. Improving the efficiency of underground mining of uranium deposits. Moscow, MGU, 2007, 212 p. [In Russ].

4. Rassulov V. A., Nerushchenko E. V. Laser-photometric lump separation of gold-bearing ore. *Obogashcheniye Rud [Mineral Dressing]*. 2020, no. 5, pp. 16–22. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.05.03.

5. 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. *Ratsional'noye osvoyeniye nedr [Rational development of subsoil]*. 2020, no. 4, pp. 64–70. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2020.57.68.008.

6. 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. *Gornyy vestnik Uzbekistana [Mining Bulletin of Uzbekistan]*. 2011, no. 1(44), pp. 17–20. [In Russ].

7. Burdakova E. A., Bragin V. I., Usmanova N. F., Vashlaev A. O., D'yachenko L. E., Lesnikova L. S., Fertikov A. I. Radiometric separation in grinding circuit of copper–nickel ore processing. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, iss. 5, pp. 824–831. DOI: 10.1134/S1062739119056197.

8. Li L., Li G., Li H., Li G., Zhangc 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.

9. Mikysek P., Trojek T., Mészárosová N., Adamovič J., Slobodník M. X-ray fluorescence mapping as a first-hand tool in disseminated ore assessment: sandstone-hosted U–Zr mineralization. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 141. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105840.

10. Priscila Maria Esteves Brandão, Camila Menezes Senna, Lucas Barreto Napoli, Edwardes Antônio Dias Junior, Vinícius Souto Morais Reis Applicability of sensor based sorting technology for processing lithium in pegmatites. *Brazilian Journal of Development, Curitiba*. 2023, vol. 9, no. 3, pp. 12504–12515. DOI: 10.34117/bjdv9n3–232.

11. Rui Sousa, Aurora Futuro, Antônio Fiúza, Mário Machado Leite. Pre-concentration at crushing sizes for low-grade ores processing Ore macro texture characterization and liberation assessment. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 147, 106156. DOI.org/10.1016/j.mineng.2019.106156.

12. Robben C., Condori P., Pinto A., Machaca R., Takala A. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 145, 105870. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105870.

13. Shepeta E. D., Samatova L. A., Voronova O. V. Promising trends in development of technologies for tungsten-containing ore and waste processing. *Gornyy zhurnal [Mining Journal]*. 2018, no. 10, pp. 67–71. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.13.

14. Shemyakin V. S., Skopov S. V., Man'kovskiy R. V., Krasil'nikov P. A., Mamonov R. S. Preliminary processing of quartz raw materials. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal [Proceedings of higher schools. Mining Journal]*. 2016, no. 8, pp. 74–79. [In Russ].

15. Bellusci N., Taylor P. R., Spiller D. E., Braman V. Coarse Beneficiation of Trona Ore by Sensor-Based Sorting. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022, vol. 39, pp. 2179–2185. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00665-2>.
16. Chelgani S. C., Neisiani A. Asimi. Dry Mineral Processing. Springer Nature Switzerland AG 2022, corrected publication 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93750-8_7.
17. 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, no. 3–1, pp. 431–442. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442.
18. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. Mineral processing technology, vol. 1. Moscow, Ruda i metally, 2007, 952 p. [In Russ].
19. 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.
20. 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.
21. Gleeson D. Preceding processing. *International Mining*. March, 2019, pp. 82–87.
22. Fedorov Yu. O., Kulikov V. I., Dementiev V. E., Voiloshnikov G. I. Preconcentration of ores as a major activity of JSC IRGIREDMET. *IMPC 2018–29th International Mineral Processing Congress*. 2019, pp. 967–978.
23. Tereshchenko S. V., Pavlishina D. N. X-ray luminescence separation of low-grade apatite ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 11, pp. 130–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-130-137.
24. RF Patent No. 2326738. The method of thermographic lump separation of raw materials (options) and the device for its implementation (options) / authors: V. M. Voloshin, V. Yu. Zubkevich. Application. 03.06.2004. Publ. 20.06.2008. [In Russ].
25. RF Patent No. RU 2546702 C1. Method of separation of diamond-containing mixtures of minerals / authors: P. P. Sharin, M. P. Lebedev, R. G. Nogovitsyn, A. M. Timofeev. Application number: 2014112683/03. Registration date: 01.04.2014. Date of publication: 10.04.2015. [In Russ].
26. Ryabkin V. K., Litvintsev E. G., Tikhvinskii A. V., Korpenko I. A., Pichugin A. N., Kobzev A. S. Polychrome photometric separation of gold bearing ores. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*. 2007, no. 12, pp. 88–92. [In Russ].
27. Tsy-pin E. F., Nikiforov D. V. The ultimate dressability and the possibilities of its formation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Gornyi Zhurnal*. 2001, no. 4–5, pp. 21–133. [In Russ].
28. Ovchinnikova T. Yu., Tsy-pin E. F., Efremova T. A., Arinov K. N. Correlation of the surface and volume component contents in lumps with different mineralization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11–1, pp. 139–153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_139. **MIAB**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цыпин Евгений Федорович — докт. техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-3921-2695> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (УГГУ), 620144, ГСП-126, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Российская Федерация, e-mail: tsipin.e@mail.ru;

Овчинникова Татьяна Юрьевна — канд. техн. наук, доцент, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7000-9295> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный универ-

ситет» (УГГУ), 620144, ГСП-126, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Российская Федерация, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru;

Ефремова Татьяна Александровна — канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-9917-6676> старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья, отдел обогащения АО «Уралмеханобр», 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Российская Федерация, e-mail: efremova_ta@umbr.ru.

Зиятдинов Сергей Владимирович — <https://orcid.org/0009-0006-6621-3748> сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья, отдел обогащения АО «Уралмеханобр», 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Российская Федерация, e-mail: svziyat@mail.ru.

Для контактов: *Овчинникова Татьяна Юрьевна*, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsy-pin E. F., ORCID iD 0000-0003-3921-2695, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Mineral Dressing Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144, office phone: + 7- (343) -275-91-54, tsipin.e@mail.ru;

Ovchinnikova T. Yu., ORCID iD 0000-0001-7000-9295, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mineral Dressing Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144, tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru;

Efremova T. A., ORCID iD 0000-0002-9917-6676, Cand. Sci. (Eng.) , Senior Researcher of the Laboratory of Mineral Dressing of Non-ferrous Metal Ores and Technogenic Raw Materials, Mineral Dressing Department of JSC “Uralmekhanobr”, 87 Khokhryakova str., Yekaterinburg, Russia, 620144, efremova_ta@umbr.ru;

Ziyatdinov S. V., ORCID iD 0009-0006-6621-3748, Researcher of the Laboratory of Mineral Dressing of Non-ferrous Metal Ores and Technogenic Raw Materials, Mineral Dressing Department of JSC “Uralmekhanobr”, 87 Khokhryakova str., Yekaterinburg, Russia, 620144, svziyat@mail.ru.

Corresponding author: *Ovchinnikova T. Yu.*, e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 22.07.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 22.07.2023; accepted for printing 10.12.2023.

