

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОКИСЛЕННОЙ МЕДНОЙ РУДЫ

Е. Ф. Цыпин<sup>1</sup>, Т. Ю. Овчинникова<sup>1</sup>, Т. А. Ефремова<sup>2</sup>, С. В. Зиятдинов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ЗАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, 620144, РФ, umbr@umbr.ru

**Аннотация:** Расширение применения методов предварительной концентрации в общем и рентгенофлуоресцентной сепарации в частности обуславливает необходимость описания этого процесса с теоретических позиций. Основной задачей любого процесса сепарации является прогноз технологических показателей разделения. Прогноз показателей разделения осуществляется с применением фракционных характеристик сырья и сепарационных характеристик аппарата, применяемого для процесса сепарации. В работе описана методика получения сепарационных характеристик процесса рентгенофлуоресцентной сепарации с применением лабораторного рентгенофлуоресцентного сепаратора РФ-100Л. Проведены эксперименты в режиме сортировки на пробе кускового материала для двух вариантов назначенных границ разделения, а также статистический анализ полученных данных. Поверхностное содержание компонента в кусках материала оценивалось посредством среднего спектрального отношения. Обнаружено, что величины средних спектральных отношений для каждого куска отличны в разных опытах по получению сепарационной характеристики, однако это отличие незначительно. Выявлено, что в качестве меры неоднородности поверхностной минерализации можно использовать среднее квадратическое отклонение спектрального отношения для нескольких реализаций сепарации одного и того же куска. Описанная методика позволяет получать экспериментальные сепарационные характеристики для разных видов минерального сырья. Учёт сепарационных характеристик промышленных аппаратов подобного типа при расчёте показателей разделения позволяет выполнять прогноз с большей точностью.

**Ключевые слова:** предварительное обогащение, рентгенофлуоресцентная сепарация (РФС), вероятность распознавания, аналитический параметр, спектральное отношение, неоднородность поверхностной минерализации, среднее квадратическое отклонение, сепарационная характеристика.

**Для цитирования:** Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Зиятдинов С. В. Получение экспериментальной сепарационной характеристики рентгенофлуоресцентного сепаратора для окисленной медной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 164–176. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_121\_0\_164.

---

## Obtaining the x-ray fluorescence separator experimental separation characteristics for oxidized copper ore

E.F. Tsypin<sup>1</sup>, T.Yu. Ovchinnikova<sup>1</sup>, T.A. Efremova<sup>2</sup>, S.V. Ziyatdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

<sup>2</sup> JSC "Uralmekhanoobr", Yekaterinburg, Russia

---

**Abstract:** Use of pre-concentration methods increases in general, and use of X-ray fluorescence separation increases in particular. So frequently requires the description of this process from a theoretical standpoint. The main aim of any separation process is to forecast the technological parameters of separation. The forecast of separation indicators is carried out using the fractional characteristics of raw materials and the separation characteristics of the equipment used for the separation process. The paper describes a technique for obtaining separation characteristics of the X-ray fluorescence separation process using a laboratory X-ray fluorescence separator SRF-100L. Experiments were carried out in the sorting mode on a sample of lumpy material for two variants of the assigned separation boundaries, a statistical analysis of the data obtained was carried out. The surface content of the component in the lumps of material was estimated by means of an average spectral ratio. It is revealed that the values of the average spectral ratios for each lump are different in different experiments to obtain a separation characteristic, but this difference is insignificant. It is revealed that as a measure of the heterogeneity of surface mineralization, the mean square deviation of the spectral ratio can be used for several implementations of separation of the same lump. The described methodology makes it possible to obtain experimental separation characteristics for different types of mineral raw materials. Taking into account the separation characteristics of industrial equipment of this type when calculating separation indicators allows make a forecast with greater accuracy.

**Key words:** preliminary ore dressing, X-ray fluorescence separation (XRF); probability recognition; analytical parameter; spectral ratio; nonuniformity of surface mineralization; mean square deviation; separation characteristic.

**For citation:** Tsypin E.F., Ovchinnikova T.Yu., Efremova T.A., Ziyatdinov S.V. Obtaining the x-ray fluorescence separator experimental separation characteristics for oxidized copper ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):164–176. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_164.

---

### Введение

Основой прогноза обогатимости сырья являются фракционные характеристики и преобразующие функции аппаратов. В фундаментальной работе О. Н. Тихонова [1] с теоретических позиций исследованы основы сепарации на базе использования характеристик фракционного состава, уравнений сепарации, сепарационных характеристик обогатительных аппаратов традиционных процессов разделения: гравитационным, магнитным, электрическим и флотационным методами.

Сепарационная характеристика связывает вероятность попадания той или иной частицы в концентрат или в хвосты в зависимости от значения признака разделения. Также она учитывает несовершенство разделения в тех или иных обогатительных процессах, при этом её использование позволяет приблизить прогнозные технологические показатели к реально получаемым.

Альтернативная группа методов, использующая не разделение в силовых полях, а сортировку на основе применения информации о сортиру-

емых объектах: радиометрический, по естественной радиоактивности [2], рентгеноабсорбционный [3–5], нейтронный [2], полихромный [6], оптический [7], рентгенолюминесцентный [8, 9] и рентгенофлуоресцентный методы; последние могут быть реализованы в вариантах покусковой [10, 11] и порционной [12–14] сортировки. Наибольшее применение данные методы находят при решении задач предварительного обогащения — как в России [15], так и за рубежом [16, 17]. Использование предварительного обогащения становится в последние годы весьма актуальным из-за ухудшения качества добываемых руд.

Отличительной особенностью перечисленных методов является обязательное наличие информационных процедур в элементарном акте разделения отдельных частиц или порций сортируемого материала, а также нанесение удаляющего воздействия на основе принятия решения об удалении некоторых из них.

Гипотетическое представление о виде фракционных и сепарационных характеристик указывает на их особенности, связанные с двухоперационностью этих процессов — измерение и обработка информации с принятием решения об удалении, то есть с наличием информационных процедур, и с избирательным принудительным удалением частиц или порций из потока. Обе операции имеют потенциальные погрешности, приводящие к особому виду сепарационных характеристик, и вероятностный характер фракционной характеристики для любого из информационных методов измерения.

Погрешности измерения при поверхностных методах получения информации связаны с колебаниями траектории движения частиц через зону

измерения, с характером неоднородности минерализации кусков, их формой, размерами, загрязнением поверхности и т.п. [17–19]. Зарубежные исследователи предлагают оценивать потенциальную эффективность сортировки с учётом погрешности измерения на основе многофакторных моделей [13], а также с применением рабочей характеристики приёмника [20], которая, в некоторой степени, аналогична сепарационной характеристике сортирующего аппарата.

На вид сепарационных характеристик влияет чувствительность измерительной аппаратуры. Существуют потенциальные погрешности удаления первого и второго рода. Погрешности первого рода вызываются нанесением удаляющего воздействия одновременно по двум и более частицам, находящимся в непосредственной близости друг от друга, а погрешности второго рода связаны с неудалением частицы при нанесении удаляющего воздействия. Особая форма частицы приводит к скользящим ударам по ней, что, как следствие, незначительно изменяет траекторию её движения, в результате такая частица может не попасть в продукт, формируемый удалением частиц из потока. Минимизация погрешностей удаления может быть резко снижена за счёт регулирования скоростного режима подачи материала в зоны измерения и удаления, а также за счёт совершенствования процессов нанесения удаляющих воздействий. Эти мероприятия позволят в дальнейшем свести такие погрешности к единичным случаям и считать их несущественными.

Погрешности измерения связаны не только с совершенствованием самой измерительной системы и алгоритмов принятия решений, но и с неоднородностью распределения минералов в объёме и по поверхности отдель-

ной частицы. На результаты получения информации влияет ориентация частицы относительно системы «источник излучения — частица — приёмник излучения».

Характер пространственной минерализации частиц при поверхностных методах измерения оказывает наиболее значимое влияние на случайную составляющую погрешности получения информации о свойствах и составе частицы. Примерами этого являются такие методы сепарации, как оптические отражательные, люминесцентные, рентгенофлуоресцентные.

Изучение влияния неоднородности поверхностной минерализации в кусках сортируемой руды выполнено ранее на искусственных моделях кусков [17, 18]. В результате выявлено значительное влияние характера неоднородности [18] на технологические показатели разделения. Для более точного прогноза показателей обогащения могут быть использованы сепарационные характеристики аппаратов, реализующих предварительное обогащение, например, рентгенофлуоресцентных сепараторов. Применение при прогнозе технологических показателей сепарационных характеристик позволит учесть свойственные данному процессу погрешности разделения.

**Целью работы** является экспериментальное получение на пробе кускового материала медной окисленной руды сепарационных характеристик для рентгенофлуоресцентного сепаратора СРФ-100Л, являющегося одноручьевым аналогом промышленных аппаратов подобного типа.

Получение сепарационной характеристики аппарата предполагает проведение опытов по разделению материала с известными значениями признака разделения, применяемого при реализации разделения в этом аппарате. Для рент-

генофлуоресцентного сепаратора таким признаком является аналитический параметр, выражающий спектральное отношение интенсивности излучения в характеристической рентгеновской области какого-либо контролируемого компонента к интенсивности в рентгеновской области рассеянного излучения. Величина аналитического параметра может быть определена для каждого из сортируемых кусков материала в момент разделения.

Для сепаратора СРФ-100Л возможности программного обеспечения позволяют во время режима сортировки фиксировать три разных, заранее настроенных, аналитических параметра для каждого из сортируемых кусков, а также три варианта распознавания и отнесения в какой-либо из получаемых продуктов каждого куска. При этом можно реализовывать неоднократное прохождение куска через измерительную систему, что важно для выявления наиболее вероятных значений аналитического параметра.

### **Методика исследований**

Применяемый для получения сепарационной характеристики признак разделения — спектральное отношение,  $H$  — является поверхностным признаком, то есть для него могут наблюдаться значительные колебания по величине  $H$  для кусков с различным характером минерализации [19], следовательно, при получении экспериментальной сепарационной характеристики необходимо организовать неоднократное измерение величины признака при прохождении каждого куска через зону измерения сепаратора. Такой приём позволяет определить среднее значение спектрального отношения с учётом частных значений, получаемых при измерении признака от каждой из граней куска.

Таким образом, методика получения экспериментальной сепарационной характеристики включает в себя следующие пункты.

1. Составление формулы для определения спектрального отношения  $H$  для выбранного контролируемого компонента.

2. Выбор границы разделения  $H_{гр}$  по величине спектрального отношения.

3. Эксперимент по разделению на сепараторе в режиме сортировки всех кусков выборки с фиксацией значений спектрального отношения  $H_i$  и варианта отнесения куска к тому или иному виду продукта, при этом каждый кусок пропускается через зону измерения заданное число ( $N$ ) раз.

4. Статистическая обработка полученных данных с последующим построением сепарационной характеристики.

Статистическая обработка заключается в вычислении следующих величин: среднее значение спектрального отношения  $H_{ср}$ , усл. ед.; среднее квадратическое отклонение спектрального отношения  $S_H$ , усл. ед.

Для построения сепарационной характеристики вида  $\varepsilon_{x(k)} = f(H_{ср})$  анализируются варианты распознавания всех реализаций каждого из кусков выборки. По результатам распознавания вида куска с последующим отнесением этого куска в соответствующий продукт вычисляется вероятность попадания каждого куска в хвосты ( $p_x$ ) и концентрат ( $p_k$ ):

$$p_x = \sum_{i=1}^{N=10} p_{x_i} / N; \quad p_k = 1 - p_x, \quad (1)$$

где  $p_{x_i}$  — однократное распознавание куска с последующим отнесением его по виду к продукту «хвосты».

Затем все куски ранжируют по возрастанию  $H_{ср}$  с последующим форми-

рованием фракций из кусков с близкими значениями  $p_x$ , для полученных фракций рассчитывают фракционные средние значения спектрального отношения —  $H_{ср\text{ фр}}$ , и вероятности распознавания для всех кусков этой фракции —  $p_{x\text{ фр}}$ . Полученные пары ( $H_{ср\text{ фр}}$ ;  $p_{x\text{ фр}}$ ) являются координатами для построения кривой.

Сепарационная характеристика аппарата позволяет судить о потенциальном качестве разделения сырья на данном аппарате [1]. Сепарационные характеристики реальных сепараторов оценивают по таким основным параметрам, как величина среднего вероятного отклонения  $E_{рм}$  и граница разделения. Оба этих параметра могут быть определены. Граница разделения — это такое значение признака разделения, при котором фракция (или частица) с таким значением признака переходит в концентрат (или хвосты) с вероятностью 0,5 д. ед. Величину среднего вероятного отклонения можно вычислить по формуле

$$E_{рм} = \frac{|H_{0,75} - H_{0,25}|}{2}, \quad (2)$$

где  $H_{0,75}$  и  $H_{0,25}$  — значение признака разделения фракции (или частицы), при котором она переходит в концентрат (или хвосты) с вероятностью 0,75 и 0,25 д. ед. соответственно.

Для получения экспериментальных сепарационных характеристик были проведены эксперименты на пробе кускового материала, представленного 55 кусками окисленной медной руды класса крупности -50+25 мм. В кусках пробы визуально отмечен различный характер поверхностной минерализации.

В качестве контролируемого компонента выбрана медь, признак разделения — спектральное отношение

интенсивности излучения в характеристической рентгеновской области меди к интенсивности в рентгеновской области рассеянного излучения  $H_{Cu}$ , усл. ед.:

$$H_{Cu} = N_{Cu} / N_s, \quad (3)$$

где  $N_{Cu}$  — интенсивность вторичного характеристического рентгеновского излучения в спектральной области меди,  $N_s$  — интенсивность рентгеновского рассеянного излучения.

Для разделения кусков пробы в режиме сортировки были назначены границы разделения  $H_{Cu\text{ гр}1}=0,1$  усл. ед. и  $H_{Cu\text{ гр}2}=0,3$  усл. ед. При проведении экспериментов по определению спектрального отношения и варианта распознавания вида куска в режиме сортировки количество реализаций составило 10 для каждого из кусков проб. Статистическая обработка полученных результатов проведена с применением стандартных формул математической статистики.

### Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты статистической обработки данных, полученных на пробе, для обеих назначенных границ разделения  $H_{Cu\text{ гр}1}=0,1$  усл. ед. и  $H_{Cu\text{ гр}2}=0,3$  усл. ед. Как показывают результаты статистической обработки, спектральное отношение контролируемого компонента изменя-

ется от сотых долей единицы до первых единиц. Так как спектральное отношение напрямую связано с поверхностным содержанием контролируемого компонента в куске, можно предположить, что куски выборки могут быть объединены во фракции с отличающимися содержаниями по контролируемому компоненту.

При проведении разделения в режиме сортировки отмечено, что величины средних спектральных отношений для каждого куска отличны в разных опытах по получению сепарационной характеристики. Для определения насколько отличны средние значения спектрального отношения, полученные для одних и тех же кусков при разных назначенных границах разделения, была построена диаграмма рассеяния в осях  $H_{Cu\text{ ср гр}1}-H_{Cu\text{ ср гр}2}$ , где  $H_{Cu\text{ ср гр}1}$ ,  $H_{Cu\text{ ср гр}2}$  — среднее значение спектрального отношения меди в куске, рассчитанное по десяти реализациям, при назначенной границе разделения 0,1 и 0,3 усл. ед. соответственно (рис. 1). Коэффициент корреляции между средними значениями  $H_{Cu\text{ ср гр}1}$  и  $H_{Cu\text{ ср гр}2}$  составил 0,9657, что говорит о том, что различия между значениями, полученными при разных границах разделения, незначительны.

Анализ расположения точек на диаграмме рассеяния позволяет сделать вывод о том, что отличие в средних

Таблица 1  
Результаты статистической обработки данных  
Statistical processing data results

Показатель	$H_{Cu\text{ гр}1}$	$H_{Cu\text{ гр}2}$
Значения спектрального отношения, усл. ед.		
минимальное $H_{Cu\text{ }i}$	0,0458	0,0514
максимальное $H_{Cu\text{ }i}$	3,8827	3,6592
интервал изменения $H_{Cu\text{ }i}$ по выборке	3,8369	3,6078
среднее (по $H_{Cu\text{ }i}$ ) по выборке	0,5616	0,5978
Среднее квадратическое отклонение спектрального отношения $S_{H_i}$ , усл. ед.	0,7643	0,7803

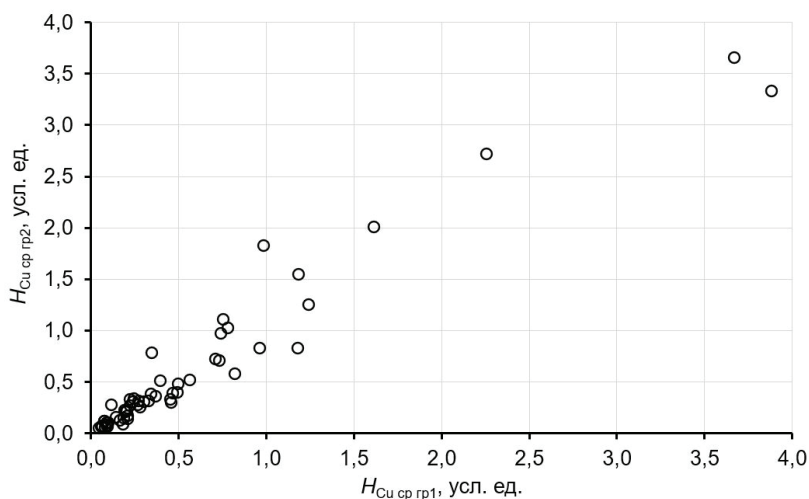


Рис. 1. Диаграмма рассеяния значений средних спектральных отношений по кускам пробы, полученных при различных границах разделения  
 Fig. 1. The scatterplot of the average spectral ratio values for sample lumps, obtained at different separation boundaries

значениях спектрального отношения, получаемых при разных назначенных границах разделения, невелико, особенно при малых значениях  $H_{Cu\ ср}$ .

В качестве меры неоднородности поверхностного признака было решено использовать среднее квадратическое отклонение частных измеренных значений спектрального отношения  $S_H$  для реализаций всех кусков пробы. Для оценки зависимости средних квадратических отклонений от среднего значения спектрального отношения были построены диаграммы рассеяния в осях  $H_{Cu\ ср} - S_H$  для значений, полученных при разных назначенных границах разделения (рис. 2).

Как показывает рис. 2, неоднородность при определении поверхностного содержания оценивается по связанной с ним величине среднего спектрального отношения и увеличивается по мере возрастания  $H$ . Отмечено, что в области преимущественно бедных по поверхностному содержанию контролируемого компонента кусков неод-

нородность меньше. Этот факт позволяет предположить, что разделение именно при низких значениях границ разделения будет эффективным.

В табл. 2 приведены данные для построения сепарационных характеристик для кусков пробы при заданных границах разделения. На рис. 3 показаны сепарационные характеристики, построенные при разделении в режиме сортировки кусков пробы при различных заданных граничных значениях спектрального отношения по меди. Ошибок за счёт неверного удаления кусков в ходе экспериментов не отмечалось.

Расчёт сепарационных характеристик был выполнен по числу кусков, отнесённых к тому или иному виду продукта, и с учётом масс этих кусков. Сравнение полученных данных показало, что отличие незначительно.

Анализ полученных экспериментальных сепарационных характеристик показал следующее: для всех характеристик отмечается наличие зоны

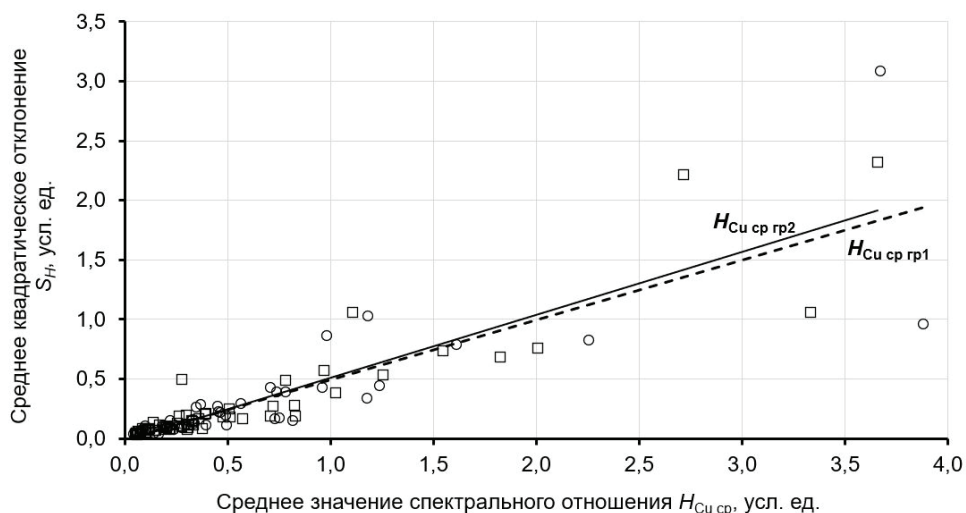


Рис. 2. Зависимость средних квадратических отклонений, полученных при различных границах разделения, от средних значений спектрального отношения для кусков пробы  
 Fig. 2. The dependence of the mean square deviations obtained at different separation boundaries on the average values of the spectral ratio for sample lumps

Таблица 2

Вероятность распознавания вида куска в зависимости от значения спектрального отношения  $H_{Cu\ гр}$  при разных границах разделения  $H_{Cu\ гр}$   
 The probability of recognizing the type of a lump depending on the value of the spectral ratio  $H_{Cu\ гр}$  at different separation boundaries  $H_{Cu\ гр}$

Среднее значение спектрального отношения во фракции, $H_{Cu\ гр}$ усл. ед.	Вероятность распознавания вида куска, доли ед.			
	$P_x$ , «хвосты»		$P_k$ , «концентрат»	
	по числу кусков	с учётом масс кусков	по числу кусков	с учётом масс кусков
<b><math>H_{Cu\ гр}=0,1</math> усл. ед.</b>				
0,061	0,8200	0,8277	0,1800	0,1723
0,092	0,5286	0,5153	0,4714	0,4847
0,178	0,1000	0,0945	0,9000	0,9055
0,221	0,0571	0,0498	0,9429	0,9502
0,313	0,0375	0,0168	0,9625	0,9832
1,128	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000
<b><math>H_{Cu\ гр}=0,3</math> усл. ед.</b>				
0,073	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000
0,139	0,9571	0,9697	0,0429	0,0303
0,241	0,7500	0,7450	0,2500	0,2550
0,312	0,4778	0,4673	0,5222	0,5327
0,420	0,2833	0,2333	0,7167	0,7667
0,741	0,0500	0,0336	0,9500	0,9664
2,053	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000



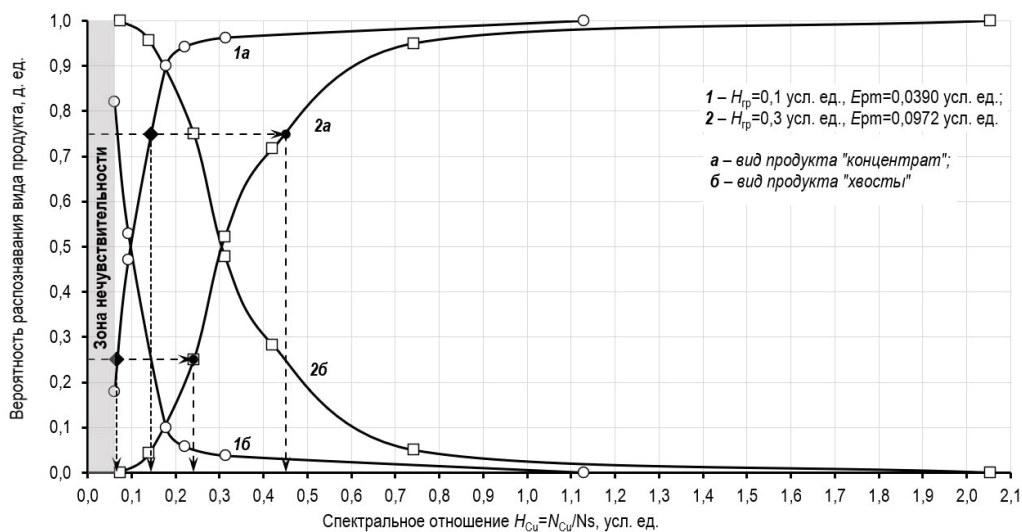


Рис. 3. Экспериментальные сепарационные характеристики  
 Fig. 3. Experimental separation characteristic, sample 1

нечувствительности. Границы разделения, определённые по сепарационным характеристикам, построенным по экспериментальным данным, близки к границам разделения, заданным при выполнении опытов по разделению, что свидетельствует о высокой точности разделения рентгенофлуоресцентной сепарацией. Этот же факт подтверждает и величина среднего вероятного отклонения  $E_{рм}$ , рассчитанная по формуле (2), которая при выделении бедных продуктов ( $H_{Cu\ гр}=0,1$  усл. ед.) составляет от 0,039 усл. ед. При увеличении границы разделения ( $H_{Cu\ гр}=0,3$  усл. ед.) величина  $E_{рм}$  также увеличивается до 0,097 усл. ед.

В целом можно отметить, что смещение границы разделения в сторону увеличения приводит к повышению значения  $E_{рм}$  и снижению потенциальной точности сепарации. Это позволяет сделать вывод о том, что рентгенофлуоресцентный сепаратор более эффективен при выделении бедных по содержанию контролируемого компонента продуктов, в этом случае воз-

можно выделить крупнокусковые хвосты с малым (отвальным) содержанием контролируемого компонента.

### Предложения по практическому применению

Предлагаемая методика позволит получать экспериментальные сепарационные характеристики рентгенофлуоресцентного сепаратора для различных видов минерального сырья. В дальнейшем эти характеристики можно использовать при прогнозе потенциальных технологических показателей разделения с применением рентгенофлуоресцентного сепаратора для изученного вида минерального сырья. Учёт влияния сепарационной характеристики необходим при проектировании и расчёте схем предварительного обогащения с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации.

### Направление будущих исследований

В будущем целесообразно изучить, как влияет выбор алгоритма разделе-

ния по различным контролируемым компонентам на вид получаемой сепарационной характеристики, с целью применения рентгенофлуоресцентных сепараторов для предварительного обогащения многокомпонентного сырья.

### **Заключение**

В результате исследований предложена методика получения экспериментальных сепарационных характеристик рентгенофлуоресцентного сепаратора. Для пробы кускового материала окисленной медной руды получены экспериментальные сепарационные характеристики процесса рентгенофлуоресцентной сепарации. Использование сепарационных характеристик при расчёте технологических показателей разделения позволяет учесть несовершенство процесса разделения в аппарате и, тем самым, позволяет выполнять прогноз с большей точностью.

Выявлено, что разделение в процессе рентгенофлуоресцентной сепарации

реализуется с большей эффективностью в области кусков с малыми значениями поверхностного признака разделения, оцениваемого по величине спектрального отношения  $N$ . Данный факт позволяет утверждать, что рентгенофлуоресцентная сепарация является более эффективной при задаче выделения относительно бедных по содержанию контролируемого компонента продуктов.

### **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. 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.

4. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining — Past, present and future // Minerals. 2019, vol. 9, iss. 9. DOI: 10.3390/min9090523.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Чантурия В. А., Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Чантурия Е. Л. Повышение извлекаемости алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации с применением люминофорсодержащих композиций // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 410–421. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-410–421.

9. Терещенко С. В., Шibaева Д. Н. Повышение качественных показателей рудопотока с использованием методов предконцентрации: теория и практика // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 60–65. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.08.

10. Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю. Моделирование процесса рентгенофлуоресцентной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–1. — С. 126–138. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_126.

11. 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, no. 6, pp. 521–524.

12. Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M. S., Knights P. Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020, vol. 35, iss. 3, pp. 153–182. DOI: 10.1080/17480930.2020.1782573.

13. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Investigation on influential factors of bulk ore sortability based on fractal modeling // Minerals Engineering. 2021, vol. 177(15). DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107362.

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

16. Veras M., Young A., Sampaio C., Petter C. A mining breakthrough: Preconcentration by sensor-based sorting // Mining Engineering. 2016, vol. 68, iss. 3, pp. 38–42.

17. Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Цыпин Е. Ф. О нижних границах классов крупности при предварительном обогащении руды с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 328–337. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_328.

18. 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.

19. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Lab-scale error analysis on X-ray fluorescence sensing for bulk ore sorting // Minerals Engineering. 2021, vol. 164, 106812. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106812.

20. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF // Minerals Engineering. 2019, vol. 146. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106130. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. Tikhonov O. N. Regularities of effective minerals separation in the processes of mineral dressing. Moscow, 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. Up-to-date technologies and equipment for radiometric concentration of uranium ores. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*, 2007, no. 2, pp. 85–87. [In Russ].

3. Alushkin I. V., Schipchin V. B., Korneyev I. G. X-ray radiometric separation from TOMRA Sorting for pre-concentration of coal. *Ugol [Coal]*. 2014, no. 5, pp. 100–103. [In Russ].

4. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining – Past, present and future. *Minerals*. 2019, vol. 9, iss. 9. DOI: 10.3390/min9090523.
5. 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.
6. 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].
7. 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.
8. Chanturia V. A., Morozov V. V., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L. Increasing the recoverability of diamonds in the process of x-ray luminescent separation using phosphor-containing compositions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, no. 14(3), pp. 410–421. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-410-421.
9. Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N. Ore quality improvement by pre-concentration: theory and practice. *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*. 2020, no. 9, pp. 60–65. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.08.
10. Tsypin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Yu. X-ray fluorescent separation process simulation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11–1, pp. 126–138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_126.
11. 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, no. 6, pp. 521–524.
12. Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M. S., Knights P. Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020, vol. 35, iss. 3, pp. 153–182. DOI: 10.1080/17480930.2020.1782573.
13. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Investigation on influential factors of bulk ore sortability based on fractal modelling. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 177(15). DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107362.
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. *Ratsional'noye osvoyeniye nedr [Rational development of subsoil]* 2020, no. 4, pp. 64–70. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2020.57.68.008.
15. Gleeson D. Preceding processing. *International Mining*. 2019, March, pp. 82–87.
16. Veras M., Young A., Sampaio C., Petter C. A mining breakthrough: Preconcentration by sensor-based sorting. *Mining Engineering*. 2016, vol. 68, iss. 3, pp. 38–42.
17. Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Tsypin E. F. Lower size grade limits in ore pretreatment using X-ray fluorescent separation. *MIAB. Mining information and analytical bulletin*. 2021, no. 11–1, pp. 328–337. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_328.
18. Ovchinnikova T. Yu., Tsypin 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.
19. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Lab-scale error analysis on X-ray fluorescence sensing for bulk ore sorting. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 164, 106812. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106812.
20. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 146. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106130.

## 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](mailto:tsipin.e@mail.ru);

*Овчинникова Татьяна Юрьевна* — канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7000-9295> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (УГГУ), 620144, ГСП-126, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Российская Федерация, e-mail: [tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru](mailto: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](mailto: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](mailto:svziyat@mail.ru).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для контактов:** *Овчинникова Татьяна Юрьевна*, e-mail: [tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru](mailto:tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru).

## 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, [tsipin.e@mail.ru](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:svziyat@mail.ru).

**For contacts:** *Ovchinnikova T. Yu.*, [tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru](mailto:tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru).

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 02.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 02.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

