

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ

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

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия, office@ursmu.ru;

² АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия, umbr@umbr.ru

Аннотация: особенности рентгенофлуоресцентной сортировки разных видов минерального сырья связаны с рядом факторов, результаты разделения при этом являются функцией многих переменных и ситуаций. Для учёта факторов необходимо создание имитационной модели процесса сортировки. Разработанная с применением пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB модель позволяет проводить имитацию процесса сортировки, основанного на принципах разделения в рентгенофлуоресцентном сепараторе, с учётом разных видов распределения минеральной фазы по объёму и поверхности кусков и геометрии измерения сепаратора. В результате имитационного моделирования получены кривые разделения, показывающие зависимость выхода хвостов от отношения массовой доли ценного компонента в хвостах сепарации к средневзвешенной массовой доле ценного компонента для сортируемых классов разной ширины при равномерном и неравномерном распределении содержания ценного компонента по объёму и поверхности куска. Полученные результаты позволяют сделать выводы о необходимости двухстороннего «осмотра» для кусков, имеющих неравномерное распределение ценного компонента по объёму и поверхности для устранения возникновения краевого эффекта, связанного с потерей информации при анализе и сортировке кусков. Для равномерного распределения ценного компонента по объёму и поверхности куска использование одностороннего «осмотра» является достаточно эффективным.

Ключевые слова: предварительное обогащение; рентгенофлуоресцентная сепарация; имитационное моделирование; минерализация кусков; геометрия измерения; кривые разделения; равномерное и неравномерное распределение содержания компонента; влияние плотности «осмотра».

Для цитирования: Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю. Моделирование процесса рентгенофлуоресцентной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-1. — С. 127–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_127.

X-ray fluorescent separation process simulation

E. F. Tsy-pin¹, T. A. Efremova², T. Yu. Ovchinnikova¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

² JSC "Uralmekhanobr", Yekaterinburg, Russia, umbr@umbr.ru

Abstract: Features of X-ray fluorescent sorting of different types of mineral raw materials are associated with a number of factors, the separation results are a function of many variables and situations. To take into account the factors, it is necessary to create a simulation model of the sorting process. The model developed using the MATLAB software package for solving

problems of technical calculations makes it possible to simulate the sorting process based on the principles of X-ray fluorescent separation, taking into account different types of the mineral phase distribution over the volume and surface of the lump and the separator measurement geometry. As a result of simulation modeling, separation curves were obtained. Its showing the tailings yield dependence on the valuable component mass fraction ratio in the separation tailings to the valuable component weighted average mass fraction for sorted classes of different widths with a uniform and uneven of the valuable component content distribution over the volume and surface of the lump. The results obtained allow us to draw conclusions about the need for two-sided “inspection” for lumps that have an uneven valuable component content distribution over the volume and surface in order to eliminate the occurrence of the edge effect associated with the loss of information during the analysis and sorting of the lumps. For uniform valuable component content distribution over the volume and surface of the lump, the use of one-sided “inspection” is quite effective.

Key words: Pre-concentration; X-ray fluorescent separation; simulation modeling; lump mineralization measurement geometry; separation curves; uniform and uneven component content distributions; influence of “inspection” integrity.

For citation: Tsyplin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Yu. X-ray fluorescent separation process simulation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):127–139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_127.

Введение

Актуальность использования нового передела между добычей минерального сырья и его обогащением с использованием традиционных технологий обосновал В. И. Ревнивцев [1]. В концепцию рудоподготовки в настоящее время помимо операций дробления, грохочения, измельчения включают и операции предварительного обогащения [2]. В настоящее время возникла тенденция усиления комплекса рудоподготовки в связи со снижением содержания ценных компонентов в вовлекаемых в переработку месторождений полезных ископаемых [3, 4]. В мировой практике для переработки отдельных видов минерального сырья в комплекс рудоподготовки вводят предварительное обогащение [5]. Предварительная концентрация может быть частью подземного обогатительного комплекса [6].

В настоящее время накоплен значительный опыт по применению гравитационных и магнитных методов для целей предварительного обогащения. В последние годы активно развиваются

информационные (сенсорные) методы предварительного обогащения [7].

Среди многих существующих информационных методов в последние годы широкое распространение находит рентгенорадиометрическая (рентгенофлуоресцентная) сепарация. Этот вид сепарации применим в стадиях предварительного обогащения для различных полезных ископаемых [8]. Рентгенорадиометрическая сепарация применяется для железосодержащих [9], свинцово-цинковых [10], медных [11], медно-никелевых [12], золотосодержащих [13], золото-медных [14], урансодержащих [15], вольфрамсодержащих [16] и сульфидных [17] руд, а также алмазосодержащего [18], кварцевого [19] и техногенного [20] сырья.

Особенности рентгенофлуоресцентной сортировки разных видов минерального сырья связаны с рядом факторов, результаты разделения при этом являются функцией многих переменных и ситуаций [21]. Среди них следует отметить меняющийся характер распределения минеральных фаз

в кусках [22], распределение по кусковым содержаниям контролируемых компонентов [23], геометрию измерения параметров разделения, границы классов крупности обогащаемого материала [24], а также технологическую цель предварительного обогащения [1].

Многофакторность делает весьма проблематичным получение основных закономерностей разделения в виде аналитических зависимостей. В таком случае приемлемым является имитационное моделирование процесса сортировки с целью расчёта технологических показателей при различном сочетании факторов и выявления принципиальных закономерностей процесса рентгенофлуоресцентной сепарации.

Целью работы является разработка имитационной модели рентгенофлуоресцентной сепарации и выявление с её помощью некоторых закономерностей процесса.

В частности, представляет интерес выявления закономерностей влияния полноты осмотра, характера минерализации и ширины сортируемого класса крупности на предполагаемые технологические показатели разделения.

Методика исследований

Моделирование процесса рентгенофлуоресцентной сепарации осуществлялось с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB.

Имитация сортировки возможна как при широком диапазоне крупности кусков, так и при разбиении материала на более узкие машинные классы, а также для случая, когда плотности минеральных фаз А и С неодинаковы: $\rho_A \neq \rho_C$.

Для любого исходного массива данных осуществляется «прогонка» каждого куска через измерительную систему сепаратора при фиксирован-

ной границе разделения $H_{гpi}$ с отнесением его к концентрату или хвостам, по завершении прохождения всех кусков массива при заданной величине $H_{гpi}$ рассчитывается масса и выходы полученных продуктов, а также массовая доля компонента в них. Расчёт при варьировании $H_{гpi}$ повторяется заданное число раз. Рассчитанные технологические показатели: выход хвостов γ_x и массовая доля компонента в хвостах ϑ позволяют построить кривые разделения вида $\gamma_x = f(\vartheta/\alpha)$ и проанализировать полученные зависимости.

При моделировании рассмотрены варианты сортировки кусков при одностороннем и двухстороннем «осмотре».

Рассмотрим идею моделирования более подробно. При моделировании вводятся следующие допущения. Обогащаемый материал представляет собой куски кубической формы, в которых содержатся две минеральные фазы: фаза А ценного компонента и фаза С породы.

Характер минерализации может быть равномерным, когда частицы фазы А равномерно распределены по объёму и поверхности куска, и неравномерным.

В последнем случае характер минерализации задаётся слоем фазы ценного компонента, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, одна грань которого совмещена с гранью куба, а площади этих граней равны. Содержание ценного компонента в куске меняется при изменении высоты параллелограмма h (рис. 1).

В модели рассматривается динамический режим перемещения куска сверху вниз относительно измерительной системы. Параметр разделения рассчитывается для каждого куска по формуле (1). В качестве параметра разделения используется спектральное отношение числа импульсов в спек-

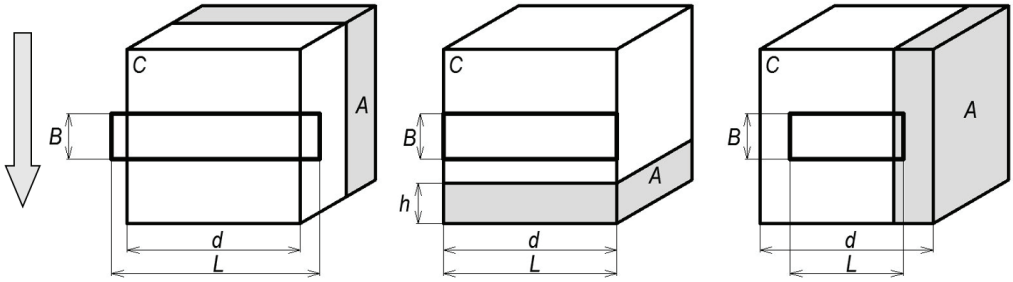


Рис. 1. Варианты положения куска по отношению к контролируемой грани при разном соотношении длины коллиматора L и размера куска d

Fig. 1. Lump position options relative to the controlled face for different ratio collimator length L and lump size d

тральной области i -го элемента $N_{\text{общ } i}$ к числу импульсов в области рассеянного излучения $Ns_{\text{общ } i}$:

$$H = N_{\text{общ } i} / Ns_{\text{общ } i} = \frac{t_2 I_i + t_1 (I_i + I_{i\phi})}{I_{s\phi} + t_1 (I_s + I_{s\phi})}, \quad (1)$$

где t_2 — время, при котором кусок полностью находится в зоне измерения, с; t_1 — время, при котором кусок проходит переходные фазы вхождения и выхода из зоны измерения, с; I_i — скорость счёта импульсов в спектральной области анализируемого i го элемента, зарегистрированных детектором от куска, имп/с; $I_{i\phi}$ — скорость счёта числа импульсов в той же области анализируемого i го элемента, зарегистрированных детектором от фона, имп/с; I_s — скорость счёта числа импульсов в области рассеянного излучения, зарегистрированных детектором от куска, имп/с; $I_{s\phi}$ — скорость счёта числа импульсов в области рассеянного излучения, зарегистрированных детектором от фона, имп/с.

Формула (2) характеризует зависимость числа импульсов, зарегистрированных детектором, от площади куска S_k , попавшей в зону облучения коллиматора с размерами $L \times B$:

$$N = N_i \cdot \frac{S_k}{L \cdot B} + N_{i\phi} \cdot \frac{L \cdot B - S_k}{L \cdot B} \quad (2)$$

Можно выделить три варианта положения куска относительно коллиматора (рис. 1), для каждого из которых можно вычислить площадь области куска с размером d , попавшего под облучение коллиматора:

в случае $d < L \rightarrow S_k = d \cdot B$;

в случае $d = L \rightarrow S_k = d^2$;

в случае $d > L \rightarrow S_k = L \cdot B$.

Кусок проходит через зону измерения в направлении перпендикулярно по отношению к потоку первичного рентгеновского излучения; содержание ценного компонента в кусках распределено по равномерному закону; кусок при измерении обращён одной гранью перпендикулярно по отношению к потоку первичного рентгеновского излучения; контролируемая при прохождении каждого куска поверхность — это поверхность одной из граней куска, выбор которой равновероятен.

Целью предварительной концентрации является выделение максимального количества кусков в хвосты, при ограничении на содержание ценного компонента в них. Поэтому наиболее информативным вариантом для оценки потенциальной обогатимости материала являются кривые, связывающие выход хвостов γ_x с содержанием ценного компонента в них ϑ и получаемые при варьировании граничного значения аналитического

параметра, оцениваемого по формуле (1). Для универсальности содержание ценного компонента в продукте разделения (хвостах) принимается в относительных значениях ϑ/α , где α — средневзвешенное содержание компонента в исходном сортируемом материале.

На рис. 2 приведена укрупнённая блок-схема моделирования процесса рентгенофлуоресцентной сепарации.

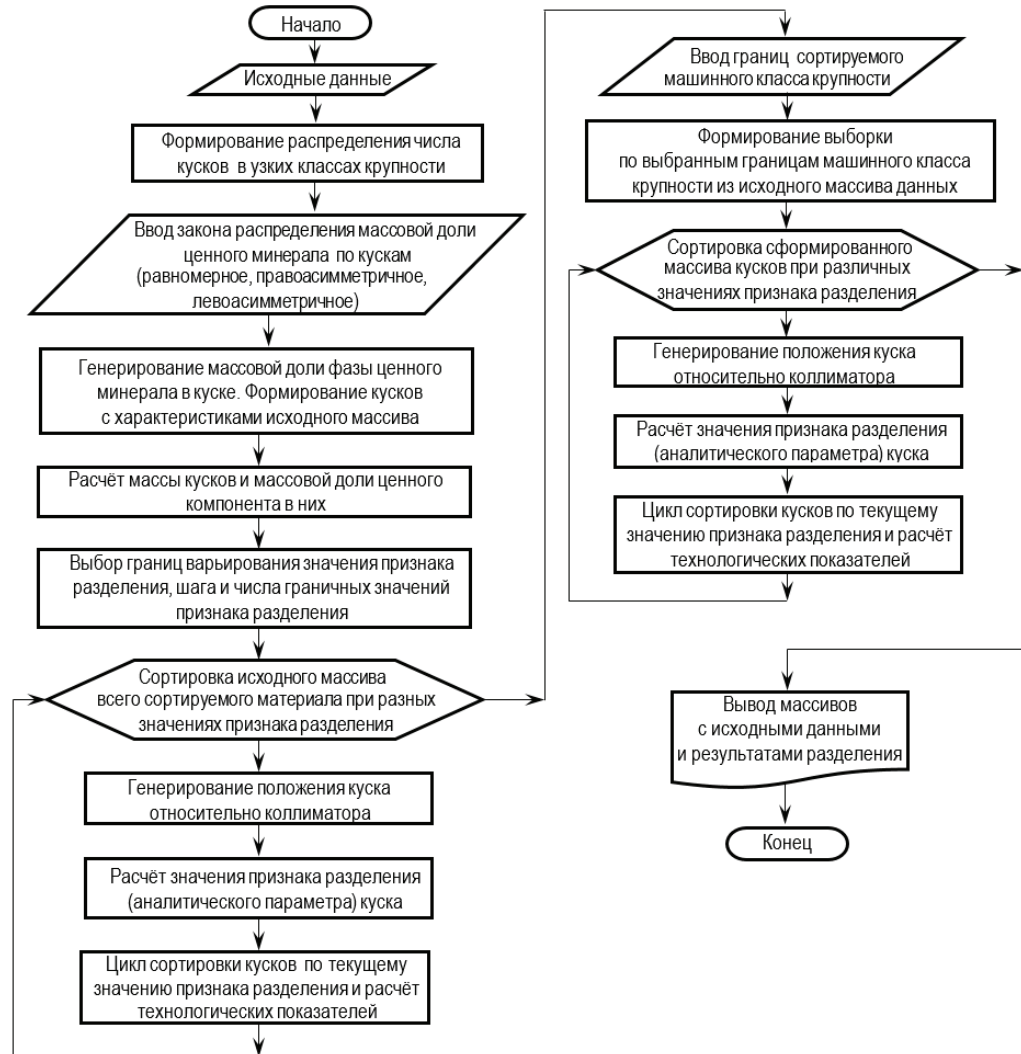


Рис. 2. Блок-схема моделирования сортировки при неравномерном распределении ценного компонента по объёму куска при одностороннем «осмотре»

Fig. 2. Block-diagram of sorting simulation for irregular distribution of valuable component over the lump volume with one-sided “inspection”

Полагалось, что материал, подвергаемый сортировке, представлен кусками кубической формы в заданном диапазоне крупности $d_{\min} \div d_{\max}$. Сортируемый массив кусков характеризуется задаваемыми гранулометрическим составом, покусковым распределением массовой доли одной из минеральных фаз в двухфазной системе с фиксированной массовой долей ценного

компонента в минеральной фазе, при этом распределение минеральной фазы по поверхности и объёму куска может быть равномерным и неравномерным.

При оценке параметра разделения куска используется геометрия измерения рентгенофлуоресцентного сепаратора, геометрические размеры коллиматора измерительной системы (ширина и длина) полагаются фиксированными: ширина коллиматора составила 20 мм, длина коллиматора — 70 мм. Через измерительную систему куски проходят по одному и на постоянном расстоянии от рентгеновского блока.

Зависимости признака разделения от соотношения средних линейных размеров куска и геометрических параметров коллиматора заданы на основе теоретического анализа, формулы (1) и (2). Параметр разделения для куска пропорционален поверхностному содержанию ценного компонента (фазы А) грани куска, обращённой к потоку первичного рентгеновского излучения.

В соответствии с приведённой на рис. 2 блок-схемой моделируется прохождение каждого куска через измерительную систему рентгенофлуоресцентного сепаратора.

На начальном этапе задаются поукосовое распределение содержаний минеральных фаз с использованием

генераторов случайных чисел (при моделировании принято равномерным); гранулометрический состав; рассчитываются характеристики каждого куска (масса, объём, содержание компонента); далее для каждого куска рассчитывается значение признака разделения и проводится сравнение расчётного значения с заданным граничным значением признака разделения.

Затем осуществляется расчёт технологических показателей разделения (выход, массовая доля ценного компонента) в продуктах разделения при каждом граничном значении признака разделения.

Расчёт технологических показателей сепарации, формирующих массив результатов, осуществляется по формулам, приведённым в табл. 1.

В расчётных формулах приняты следующие условные обозначения:

n — количество кусков в сортируемом массиве;

u — количество кусков сортируемого массива, выделенных в концентрат;

v — количество кусков сортируемого массива, выделенных в хвосты;

m_i — масса i -го куска сортируемого массива;

m_j — масса j -го куска, выделенного в концентрат;

Таблица 1

Формулы для расчёта технологических показателей

Formulas for technological indicators calculating

Продукт	Показатель, д. ед.	
	выход	массовая доля ценного компонента
Концентрат	$\gamma_{\kappa} = \frac{\sum_{j=1}^u m_j}{\sum_{i=1}^n m_i}$	$\alpha_{\kappa} = \frac{\sum_{j=1}^u \alpha_j m_j}{\sum_{j=1}^u m_j}$
Хвосты	$\gamma_x = \frac{\sum_{k=1}^v m_k}{\sum_{i=1}^n m_i}$	$\alpha_x = \vartheta = \frac{\sum_{k=1}^v \alpha_k m_k}{\sum_{k=1}^v m_k}$

m_k — масса k -го куска, выделенного в хвосты;

α_j — содержание ценного компонента в j -ом куске, выделенном в концентрат;

α_k — содержание ценного компонента в k -ом куске, выделенном в хвосты.

Для моделирования сортировки кусков с неравномерным распределением минеральных фаз по объёму и поверхности куска выбран случай, когда ценный минерал концентрируется у одной грани куска. Таким образом, формируется шесть вариантов положения куска (ценного минерала) относительно измерительной системы сепаратора.

Вариант положения куска, попавшего в зону облучения, генерируется по равномерному закону случайным образом. Значение признака разделения рассчитывается исходя из того, какая часть грани куска попадёт в зону облучения, обусловленную соотношениями размера куска и коллиматора.

Сортировка ведётся на основе сравнения поверхностного признака разделения куска, формируемого при его прохождении через зону измерения, с граничным значением, в результате чего формируются продукты разделения — концентрат и хвосты сортировки.

На завершающем этапе формируются выборки по крупности — интересующие классы крупности, границы которых задаются, и производится расчёт технологических показателей сепарации данных классов крупности с выводом окончательных результатов моделирования.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты моделирования сортировки кусков для равномерного закона распределения покусковых содержаний фазы А. Результаты представлены в виде кривых разделения вида $\gamma_x = f(\vartheta/\alpha)$, показы-

вающих зависимость выхода хвостов γ_x от отношения массовой доли ценного компонента в хвостах сепарации ϑ к средневзвешенной массовой доле ценного компонента α в соответствующем сортируемом классе при равномерном (рис. 3, а) и неравномерном (рис. 3, б, в) распределении содержания ценного компонента (минеральной фазы А) по поверхности и объёму куска для сортируемых классов с различными граничными значениями крупности -80+20, -70+30 и -60+40 мм и одинаковым средним $d_{cp} = 50$ мм.

Для кривых, приведённых на рис. 3, а, при увеличении ширины сортируемого класса крупности при постоянном среднем размере куска в нём происходит уменьшение выхода хвостов при фиксированной заданной массовой доле ценного компонента в хвостах. Одной из причин этого является значимая зависимость сигнала измерительной системы от соотношения длины коллиматора и размера куска. Следовательно, требуется увеличение числа сортируемых классов для потенциального роста выхода отвальных хвостов.

Кривые на рис. 3, б представляют результаты моделирования сортировки кусков с неравномерным распределением минеральных фаз по объёму и поверхности куска при одностороннем «осмотре» куска. Следует отметить ярко выраженные краевые эффекты в характеристиках связи $\gamma_x = f(\vartheta/\alpha)$, возникновение которых объясняется наличием неблагоприятных вариантов положения куска относительно измерительной системы — когда в зону измерения попадает только либо минерализованная ценным компонентом поверхность куска, либо поверхность куска, не содержащая ценный компонент.

Таким образом, характер минерализации значительно влияет на технологические показатели и наиболее

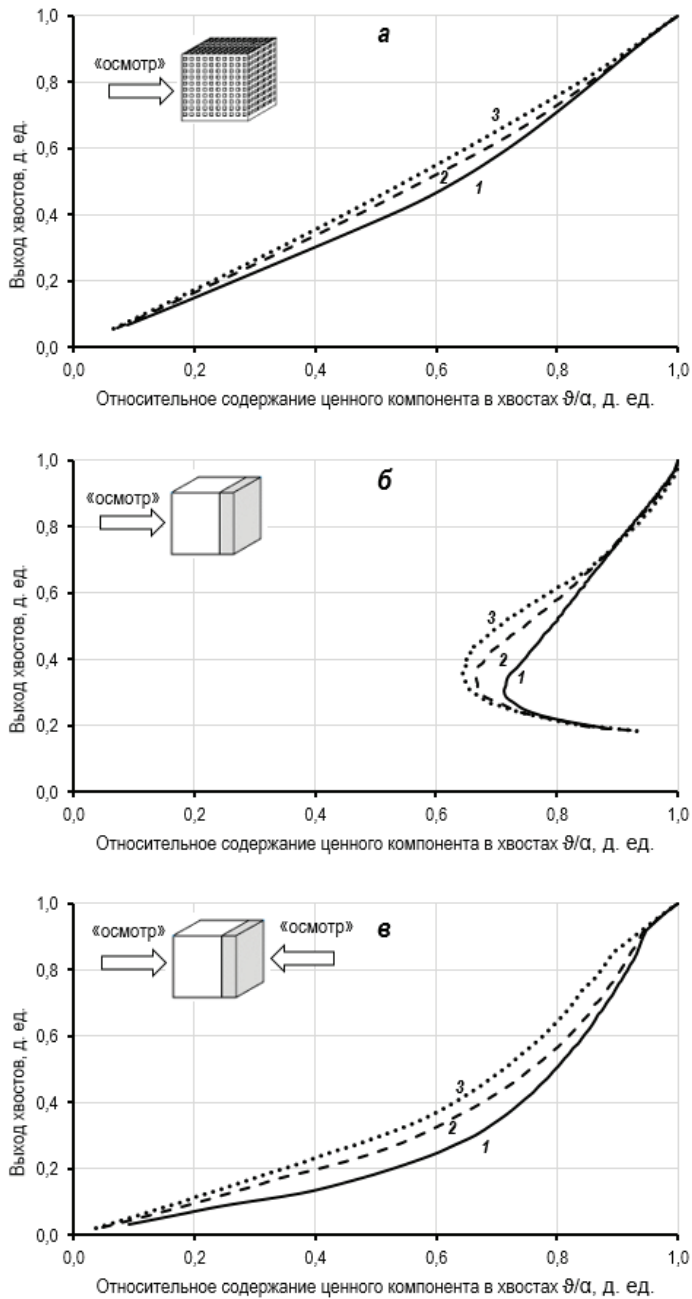


Рис. 3. Кривые разделения, полученные при моделировании одностороннего (а, б) и двухстороннего (в) «осмотра» для равномерного (а) и неравномерного (б, в), распределения содержания ценного компонента по поверхности и объёму куска для разных классов крупности с одинаковым $d_{cp} = 50$ мм: 1 – класс $-80+20$ мм; 2 – класс $-70+30$ мм; 3 – класс $-60+40$ мм
 Fig. 3. Separation curves obtained by modeling a one-sided (a, б) and two-sided “inspection” for uniform (a) and uneven (б, в), component content distributions on surface and volume of lump for different size classes with equal $d_{av} = 50$ mm: 1 – class $-80+20$ mm; 2 – class $-70+30$ mm; 3 – class $-60+40$ mm

сложным при сортировке является вышеописанный случай.

Для минимизации потерь информации при анализе сортируемых кусков необходимо рассмотреть варианты «осмотра» куска с большей контролируемой площади, что может быть достигнуто, например, за счёт двухстороннего «осмотра», то есть при использовании двух измерительных систем, расположенных с противоположных сторон по отношению к траектории движения куска.

На рис. 3, в представлены результаты моделирования сортировки кусков с неравномерным распределением минеральных фаз по объёму и поверхности куска выбранного выше варианта при двухстороннем «осмотре» куска. При моделировании сепарации с двухсторонним «осмотром» куска предполагается, что «осмотр» ведётся двух противоположных граней куска. В случае с двухсторонним «осмотром» куска с неравномерной минерализацией полученные зависимости демонстрируют отсутствие ярко выраженного краевого эффекта, что в свою очередь положительно влияет на технологические показатели разделения.

Вариант двухстороннего «осмотра» позволяет минимизировать потери информации при анализе и сортировке кусков. При сложном варианте минерализации необходим двухсторонний «осмотр» кусков.

Прирост выхода хвостов при сортировке с целью предварительной концентрации в этом случае, как и при характере минерализации с равномерным распределением компонента по объёму и площади кусков, может быть достигнут при уменьшении ширины сортируемых классов.

Предложения по практическому применению

Результаты моделирования указывают на целесообразность создания

рентгенофлуоресцентных сепараторов с двухсторонним «осмотром» сортируемых кусков для видов сырья со сложным характером минерализации.

Направление будущих исследований

В будущем целесообразно провести моделирование для случаев рентгенофлуоресцентной сортировки материала с различным характером распределения по кусковым содержаниям ценных компонентов, встречающихся в практике предварительной концентрации минерального сырья.

Заключение

Исследованиями показано влияние характера минерализации сортируемых кусков на результаты рентгенофлуоресцентной сепарации, иллюстрируется возникновение краевого эффекта для случая неравномерного распределения минеральных фаз по объёму и поверхности кусков, приводящего к резкому снижению технологических показателей сортировки. Устранение краевого эффекта и рост технологических показателей могут быть достигнуты за счёт применения измерительных систем рентгенофлуоресцентных сепараторов с двухсторонним «осмотром» кусков. Повышению технологических показателей способствует также сужение границ сортируемых классов.

В случае равномерного распределения минеральной фазы по объёму и поверхности куска использование одностороннего «осмотра» является достаточно эффективным.

Благодарность

Авторы выражают искреннюю признательность Елизарову Дмитрию Борисовичу за помощь в разработке программ для создания алгоритмов имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ревнивцев В. И.* О фундаментальных исследованиях в области обогащения полезных ископаемых // Переработка труднообогатимых руд. — М.: Наука, 1987. — С. 4–16.
2. *Цыпин Е. Ф.* Предварительное обогащение // Известия вузов. Горный журнал. 2001. №4–5. С. 82–104.
3. *Максимов И. И.* XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. — С. 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01.
4. *Максимов И. И., Баранов В. Ф., Богданович А. В., Кибирев В. И.* XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 2) // Обогащение руд. 2015. № 6. — С. 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10.
5. *Gleeson D.* Preceding processing // International Mining. March, 2019. — pp. 82–87.
6. *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.
7. *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.
8. *Fedorov, Yu.O., Kulikov, V.I., Dementiev, V.E., Voiloshnikov, G.I.* IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 967–978.
9. *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.
10. *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.
11. *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, Volume 121, 1 June 2018, P. 129–136. DOI 10.1016/j.mineng.2018.02.023.
12. *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.
13. *Завьялов С. С., Мамонов Р. С.* Комбинированная технология сухого предварительного обогащения золотосодержащей руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 338–345. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338.
14. *Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C. J.R.* Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation // Minerals Engineering, Vol. 121, 1 June 2018. DOI 10.1016/j.mineng.2018.02.004.
15. *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, Vol. 141, September 2019. DOI 10.1016/j.mineng.2019.105840.
16. *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.
17. *Санакулов К. С., Руднев С. В.* Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения «Кокпатас» // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1(40). С. 3–7.
18. *Rakhmееv R. N., Fedorov Yu.O., Chikin A.Yu., Kononko R. V.* X-ray radiometric and triboelectric separation of diamond-bearing materials // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 748–756.
19. *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.

20. Шемякин В. С., Скопов С. В., Цыпин Е. Ф., Шемякин А. В. Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных образований Уральского региона // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 29–33.

21. Мокроусов В. А., Лилеев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М.: Недра, 1979. — 192 с.

22. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF // Minerals Engineering. Vol. 146 15 January 2020. DOI 10.1016/j.mineng.2019.106130.

23. Цыпин Е. Ф., Аринов К. Н., Овчинникова Т. Ю. Фракционные характеристики сырья при поверхностных способах получения информации // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. — С. 87–92.

24. Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю., Елизаров Д. Б. Влияние фракционирования по крупности на эффективность рентгенорадиометрической сепарации полиметаллической руды // Обогащение руд, № 3. 2018. С. 14–19. DOI 10.17580/or.2018.03.03 **МИАБ**

REFERENCES

1. Revnivtsev V. I. About fundamental researches in the field of mineral processing]. Pererabotka trudnoobogatimyykh rud [Processing of hard-to-enrich ores]. Moscow. Nauka, 1987. pp. 4–16. [In Russ]

2. Tsy-pin E. F. Preliminary concentration. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, *Gornyi Zhurnal* [Proceedings of higher schools. Mining Journal], 2001. No.4–5. pp. 82–104.

3. Maksimov I. I. The XXVII International Congress on Mineral Dressing (Part 1)], *Obogashcheniye Rud* [Mineral Dressing], 2015, no. 3, pp. 3–11. DOI: 10.17580/or.2015.03.01. [In Russ].

4. Maksimov I. I. Baranov V. F., Bogdanovich A. V., Kibirev V. I. The XXVII International Congress on Mineral Dressing (Part 2), *Obogashcheniye Rud* [Mineral Dressing], 2015, no. 6, pp. 50–58. DOI: 10.17580/or.2015.06.10. [In Russ].

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

6. 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

7. 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.

8. Fedorov, Yu. O., Kulikov, V. I., Dementiev, V. E., Voiloshnikov, G. I. IMPC 2018 29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 967–978.

9. 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. No.6. pp. 521–524.

10. 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]

11. 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*, Volume 121, 1 June 2018, P. 129–136. DOI 10.1016/j.mineng.2018.02.023

12. 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.

13. Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Mixed-type dry pretreatment technology for gold-bearing ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. No.11–1, pp. 338–345. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_338 [In Russ].

14. Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C. J.R. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation. *Minerals Engineering*, Vol. 121, 1 June 2018. DOI 10.1016/j.mineng.2018.02.004.

15. 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*, Vol. 141, September 2019. DOI 10.1016/j.mineng.2019.105840.

16. 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 DOI 10.17580/gzh.2018.10.13 [In Russ].

17. Sanakulov K. S., Rudnev S. V. X-ray radiometric processing complex for sulfide ores of the Kokpatas deposit. *Gornyy vestnik Uzbekistana* [Mining Bulletin of Uzbekistan]. 2010. No.1 (40). pp. 3–7. [In Russ].

18. Rakhmееv R. N., Fedorov Yu.O., Chikin A.Yu., Kononko R. V. X-ray radiometric and triboelectric separation of diamond-bearing materials. IMPC 2018 29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 748–756.

19. 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].

20. Shemyakin V. S., Skopov S. V., Tsy-pin Ye. F., Shemyakin A. V. X-ray radiometric separation of mineral raw materials and technogenic formations of the Ural region. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [Proceedings of higher schools. Mining Journal], 2011, no. 4, pp. 29–33. [In Russ].

21. Mokrousov V. A., Lileyeв V. A. Radiometric processing of non-radioactive ores. M.: Nedra, 1979. 192 p. [In Russ].

22. Li G., Klein B., Sun C., Kou J. Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF. *Minerals Engineering*. Vol. 146 15 January 2020. DOI 10.1016/j.mineng.2019.106130.

23. Tsy-pin E. F., Arinov K. N., Ovchinnikova T. Yu., Fractional characteristics of raw materials with surface methods of obtaining information. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Gornyy Zhurnal* [Proceedings of higher schools. Mining Journal]. 2011. no. 4. pp. 87–92. [In Russ].

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цыпин Евгений Федорович — доктор 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;

Ефремова Татьяна Александровна — научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья, отдел обогащения,

АО «Уралмеханобр», 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Российская Федерация,

<https://orcid.org/0000-0002-9917-6676>,

e-mail: efremova_ta@umbr.ru;

Овчинникова Татьяна Юрьевна — канд. техн. наук, доцент, 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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для контактов: *Овчинникова Татьяна Юрьевна*,

e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsygin E. F., 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;

ORCID iD 0000-0003-3921-2695;

Efremova T. A., 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,

<https://orcid.org/0000-0002-9917-6676>;

Ovchinnikova T. Yu., 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,

ORCID iD 0000-0001-7000-9295,

tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

For contact: *Ovchinnikova T. Yu.*,

e-mail: tatyana.ovchinnikova@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.

