

## СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ С КРУПНОСТЬЮ СОРТИРУЕМЫХ КЛАССОВ

ЦЫПИН Е. Ф.<sup>1</sup>, ЕФРЕМОВА Т. А.<sup>2</sup>, ЕЛИЗАРОВ Д. Б.<sup>3</sup>, ОВЧИННИКОВА Т. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30)

<sup>2</sup> АО «Уралмеханобр»

(Россия, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 62)

<sup>3</sup> Уральский государственный экономический университет  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62)

**Предмет и цель работы.** Метод рентгенорадиометрической сепарации, использующий поверхностные признаки разделения, требует соблюдения определенных технологических приемов подготовки сырья к разделению, в частности выделения из исходного материала сортируемых классов. Различные распределения покускового содержания минеральных фаз, характер минерализации разделяемых кусков, применяемая геометрия измерения рентгеновских характеристик кусков при сепарации, соотношения параметров гранулометрических характеристик материала и элементов измерительной системы влияют на эффективность сепарации при назначении границ сортируемых классов. Целью данной работы является исследование влияния границ сортируемых классов и количества этих классов при различных покусковых распределениях содержания минеральных фаз в сырье на эффективность разделения.

**Методология.** Для получения общих закономерностей о связях характеристик сырья и требуемых границ сортируемых классов была использована имитационная модель, учитывающая гранулометрический состав, распределение по содержанию минеральных фаз в кусках руды, характеристики идеального сепаратора, позволяющая осуществлять прогноз технологических показателей разделения.

**Результаты и область применения результатов.** Результатами моделирования являются кривые разделения для различных сортируемых классов крупности и плотностей распределения по содержанию минеральных фаз в кусках руды. В случае отнесения реального сырья к какому-либо типу из числа рассмотренных при моделировании могут быть осуществлены прогнозы технологических показателей разделения при различных границах сортируемых классов, выбрано требуемое число сортируемых классов и их границы.

**Выводы.** На эффективность разделения и возможность получения бедных хвостов при различной ширине сортируемых классов влияет характер покускового распределения содержания минеральных фаз. При разработке схемы (выборе числа и границ сортируемых классов) необходимо учитывать характер покускового распределения содержания минеральных фаз.

**Ключевые слова:** предварительное обогащение; рентгенорадиометрическая сепарация; число сортируемых классов; имитационная модель; кривые разделения.

**Введение.** Предварительное обогащение – один из современных трендов развития обогатительной технологии [1–3]. В предварительном обогащении могут решаться различные технологические задачи, из них наиболее часто решаемой является задача предварительной концентрации, обеспечивающей ряд технологических, экономических и экологических преимуществ благодаря выводу части бедных кусковых хвостов, снижению затрат на транспортировку и глубокое обогащение, снижению платежей при складировании отходов.

Среди используемых методов особое значение имеют информационные методы обогащения [4–8], такие как радиометрические, рентгенорадиометрические, рентгенолюминесцентные, оптические, фотометрические, рентгеноабсорбцион-

ные, нейтронные, радиорезонансные. Наиболее универсальным и востребованным является рентгенорадиометрический (рентгенофлуоресцентный) метод [9–12]. Этот метод имеет ряд преимуществ перед другими информационными методами. Он имеет относительно высокую чувствительность, что позволяет осуществлять разделение при малых содержаниях компонентов. Данный метод применим для крупнокусковых продуктов (до 350–400 мм), позволяет определять содержания нескольких элементов одновременно и поэтому использовать наиболее выгодные алгоритмы сепарации многокомпонентных руд с решением разных технологических задач.

Предварительному обогащению с использованием этого метода подвергают различные виды минерального сырья. Рентгенорадиометрическая сепарация может быть использована для получения концентратов или для предварительной концентрации медных и медно-цинковых руд [13], свинцово-цинковых руд [14], золотосодержащих руд [15], алмазных [16], марганцевых, хромовых, сидеритовых руд [17], урановых руд [18], кварца [19], полевых шпатов [20], бокситов [21], угля [22] и других видов минерального сырья.

Рентгенорадиометрическая сепарация относится к методам, использующим поверхностные признаки разделения. Это требует соблюдения определенных технологических приемов подготовки сырья к разделению, в частности разделения исходного материала на сортируемые классы. Различные распределения по кусковому содержанию минеральных фаз, характер минерализации разделяемых кусков, применяемая геометрия измерения рентгеновских характеристик кусков при сепарации, соотношения параметров гранулометрических характеристик материала и элементов измерительной системы влияют на эффективность сепарации при назначении границ сортируемых классов.

Различные виды минерального сырья отличаются кусковым распределением содержаний компонентов при одинаковых границах сортируемых классов и поэтому могут иметь разные показатели разделения. Однако это обстоятельство не учитывается при разработке схем рудосортировочного комплекса. Целью данной работы является исследование влияния границ сортируемых классов и количества этих классов при различных кусковых распределениях содержаний минеральных фаз в сырье на эффективность разделения.

**Методология.** Многообразие возможных сочетаний, которые потенциально могут встречаться при обогащении различных видов сырья, из-за отсутствия представительной коллекции проб различных видов минерального сырья не позволяет на основе натуральных экспериментальных исследований установить связи между характеристиками сепарируемого сырья и различными границами классов. Такую возможность дает метод имитационного моделирования с заданием самых разнообразных ситуаций и характеристик сырья. Результатом имитационного моделирования может быть получение общих закономерностей о связях характеристик сырья и требуемых границ сортируемых классов. В случае отнесения реального сырья к какому-либо типу из числа рассмотренных при моделировании могут быть осуществлены прогнозы технологических показателей разделения при различных границах сортируемых классов, выбрано требуемое число сортируемых классов и их границы. Такая информация должна использоваться при проектировании схем рудосортировочных комплексов.

Используемая в исследованиях модель построена согласно следующим принципам:

– сырье характеризуется гранулометрической характеристикой, кусковым распределением содержания одной из минеральных фаз  $\alpha$  в двухфазной системе с фиксированным содержанием компонента (элемента) в минеральных фазах

(в расчетах принято  $\beta_m = 0,3$  доли ед.), при допущениях о кубической форме всех кусков, постоянстве плотности минеральных фаз и равномерном распределении минеральных фаз по объему и поверхности отдельных кусков;

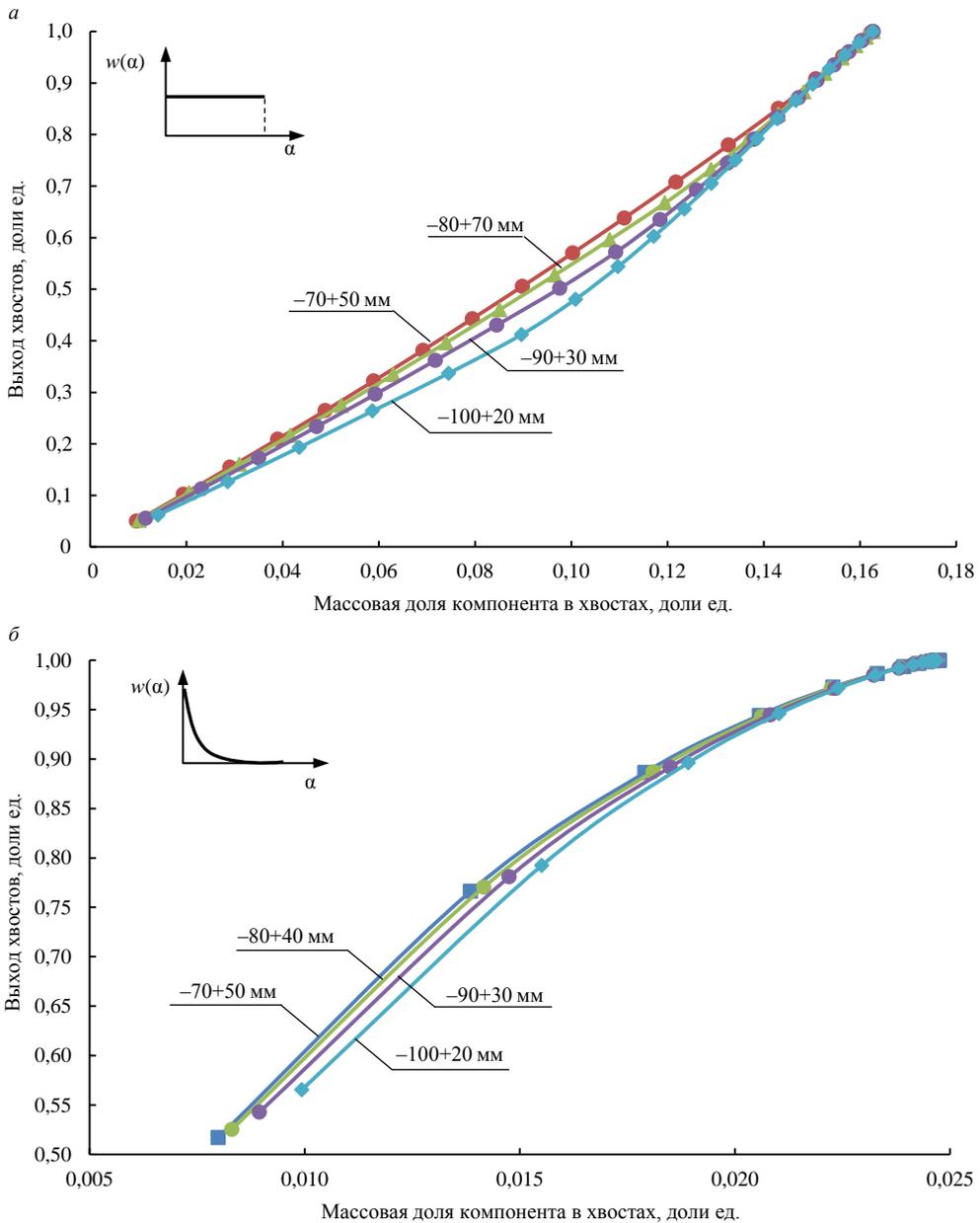


Рис. 1. Полученные при моделировании кривые разделения при разных покусковых распределениях минеральной фазы  $\alpha$  и одинаковом среднем размере куска в сортируемом классе ( $d_{cp} = 60$  мм): а – равномерное распределение,  $\alpha_{cp} = 0,5$  доли ед.; б – правоасимметричное распределение,  $\alpha_{cp} = 0,074$  доли ед.  
 Fig. 1. Partition curves obtained at modeling under various lump distributions of mineral phase  $\alpha$  and uniform average lump sizes in the sorted fraction ( $d_{cp} = 60$  mm):

а – uniform distribution,  $\alpha_{cp} = 0,5$  unit fraction; б – right asymmetrical distribution,  $\alpha_{cp} = 0,074$  unit fraction

– геометрия измерения *рентгеновская трубка–коллиматор–кусок–детектор* с измерением рентгеновского излучения в обратном по отношению к первичному рентгеновскому излучению направлении с задаваемыми шириной и длиной кол-

лиматора, равной при моделировании 75 мм, при допущении прохождения куска на постоянном расстоянии от рентгеновского блока (от коллиматора, детектора);

– зависимости характеристик рентгеновского излучения (характеристических элементов, рассеянного излучения, их спектральных отношений) от соотношения размеров куска и коллиматора для каждой из минеральных фаз заданы на основе теоретического анализа и экспериментальных данных при допущении об аддитивности при различном содержании минеральных фаз в куске;

– имитируется прохождение единичного куска через измерительную систему сепаратора, характеристики куска получают с использованием генераторов случайных чисел для гранулометрической характеристики исходного и покусковых распределений содержаний минеральных фаз (параметры генераторов могут меняться), рассчитываются характеристики частицы (масса, объем, содержание компонента), сравнивается полученное расчетное значение параметра разделения куска с заданным граничным значением, принимается решение об отнесении куска в тот или иной продукт, при этом используется допущение об идеальном выделении куска в нужный продукт;

– осуществляется расчет технологических показателей разделения (выходов, массовых долей) по массам кусков и массам минеральных фаз, перешедших в конечные продукты.

**Результаты исследований.** На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования с различным покусковым распределением содержания минеральной фазы  $\alpha$ .

Результаты разделения четырех сортируемых классов разной ширины с одинаковым значением среднего размера куска ( $d_{cp} = 60$  мм), где содержание минеральной фазы  $\alpha$  по кускам распределено по равномерному закону, показаны на рис. 1, *a*.

Рис. 1, *б*; 2, *a* и 2 *б* соответствуют случаям, когда минеральная фаза  $\alpha$  по кускам распределена по правоасимметричным законам. На рис. 1, *б* и 2, *a* представлены результаты моделирования разделения в четырех сортируемых классах разной ширины с одинаковым значением среднего размера куска ( $d_{cp} = 60$  мм) при различных видах правоасимметричного распределения минеральной фазы  $\alpha$ . На рис. 2, *б* рассмотрено разделение в трех сортируемых классах с разным значением среднего размера куска и одинаковой шириной классов (20 мм).

**Обсуждение результатов.** При равномерном распределении доли минеральной фазы  $\alpha$  увеличение ширины сортируемого класса при постоянном среднем размере куска в нем приводит к уменьшению выхода хвостов при фиксированной заданной массовой доле элемента в хвостах (рис. 1, *a*).

При правоасимметричном покусковом распределении минеральной фазы  $\alpha$  (рис. 1, *б*) с  $\alpha_{cp} = 0,074$  доли ед. при сужении ширины сортируемого класса прирост выхода хвостов невелик, при правоасимметричном покусковом распределении со средним содержанием компонента (элемента)  $\alpha_{cp} = 0,12$  доли ед. наблюдается больший прирост выхода хвостов (рис. 2, *a*). При сужении границ сортируемого класса возможно получение хвостов с меньшей массовой долей компонента (элемента).

В случае правоасимметричного покускового распределения доли минеральной фазы  $\alpha$  при размере среднего куска намного меньше длины коллиматора ( $d_{cp} = 30$  мм), бедные хвосты получить нельзя, по сравнению с частицами соразмерными с длиной коллиматора ( $d_{cp} = 60$  и 90 мм) (рис. 2, *б*), для которых получение более бедных хвостов возможно.

Таким образом, увеличение ширины класса крупности при любом покусковом распределении содержания минеральной фазы  $\alpha$  приводит к уменьшению выхода хвостов при фиксированной заданной массовой доле компонента (элемента)

в хвостах. При правоасимметричном покусковом распределении доли минеральной фазы  $\alpha$  в частице, если размер частицы намного меньше длины коллиматора, бедные хвосты получить нельзя, а при размерах кусков, соразмерных с длиной

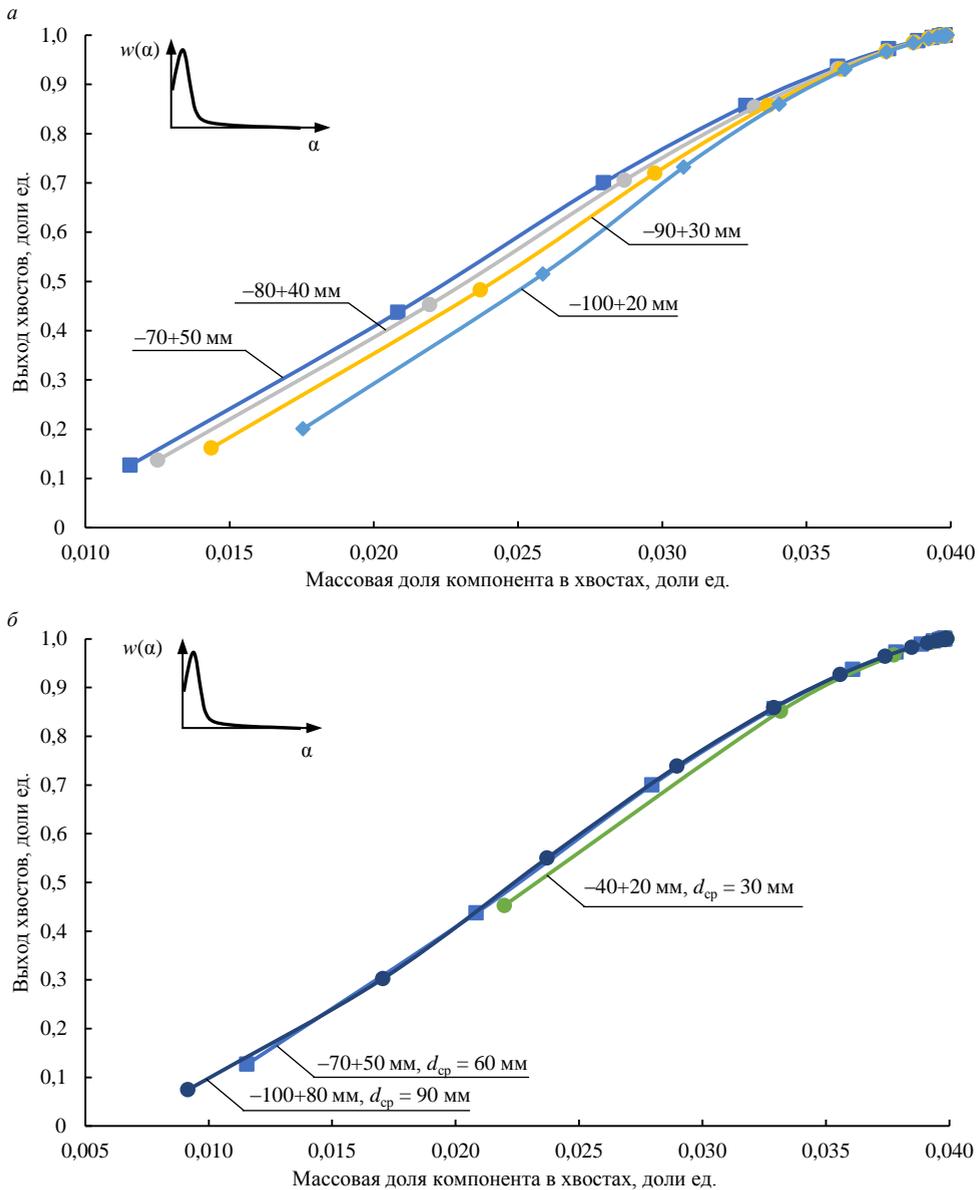


Рис. 2. Полученные при моделировании кривые разделения при одинаковом покусковом распределении минеральной фазы  $\alpha$  ( $\alpha_{cp} = 0,12$  доли ед.) и разным среднем размере куска в сортируемом классе: *a* – при разной ширине сортируемых классов и одинаковом среднем размере куска ( $d_{cp} = 60$  мм); *b* – при одинаковой ширине сортируемых классов (20 мм) и разных средних размерах кусков в них

Fig. 2. Partition curves obtained at modeling under uniform lump distributions of mineral phase  $\alpha$  ( $\alpha_{cp} = 0.12$  unit fraction) and various average lump sizes in the sorted fraction:

*a* – under various width of the sorted fractions and uniform average sizes of lumps ( $d_{cp} = 60$  mm); *b* – under uniform width of the sorted fractions (20 mm) and various average sizes of lumps

коллиматора, могут быть получены более бедные хвосты. При правоасимметричных покусковых распределениях минеральной фазы  $\alpha$  при сужении ширины сортируемого класса наблюдается небольшой прирост выхода хвостов, причем это

в большей степени характерно для распределения, показанного на рис. 2, а, в сравнении с распределением, приведенным на рис. 1, б. При правоасимметричных покусковых распределениях минеральной фазы  $\alpha$  при сужении ширины сортируемого класса можно получить хвосты с меньшей массовой долей компонента (элемента) в относительно узком классе крупности.

**Выводы.** На эффективность разделения и возможность получения бедных хвостов при различной ширине сортируемых классов влияет характер покускового распределения содержаний минеральных фаз. В случае выраженного правоасимметричного распределения для получения бедных хвостов и повышения их выхода необходимо увеличить число сортируемых классов. При равномерном распределении также требуется увеличение числа сортируемых классов для потенциального роста выхода отвалных хвостов. Одной из причин является значимая зависимость сигнала измерительной системы от соотношения длины коллиматора и размера куска. При разработке схемы (выборе числа и границ сортируемых классов) необходимо учитывать характер покускового распределения содержаний минеральных фаз, что следует использовать при проектировании схем рудосортировочных комплексов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 1) // Обогащение руд. 2015. № 3. С. 3–11.
2. Максимов И. И. XXVII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых (часть 2) // Обогащение руд. 2015. № 6. С. 50–58.
3. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants // Proc. of XXVII Int. Min. Proc. Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 1. P. 51.
4. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б. Кластер информационных методов обогащения полезных ископаемых // ГИАБ. 2017. Спец. вып. № 23. С. 483–492.
5. Knapp H., Neubert K., Wotruba H. Simulation of sensor-based sorting on drill core analysis // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014. Chap. 16. P. 21–30.
6. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile, 2014. Chap. 16. P. 106–115.
7. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine // Proc. of the XXVII Int. Min. Congress. Santiago, Chile: Gecamin, 2014. Chap. 16. P. 159–168.
8. Кобзев А. С. Направления развития и проблемы радиометрических методов обогащения минерального сырья // Обогащение руд. 2013. № 1. С. 13–17.
9. Федоров Ю. О., Кацер И. У., Корнев О. В., Короткевич В. А., Цой В. П., Ковалев П. И., Федоров М. Ю., Поповский Н. С. Опыт и практика рентгенорадиометрической сепарации руд // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 5. С. 21–37.
10. Федоров М. Ю. Новые технические разработки, обеспечивающие повышение эффективности оборудования и технологий с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 8. С. 103–110.
11. Пестов В. В. Разработка и использование программно-методического обеспечения рентгенофлуоресцентной сепарации минерального и техногенного сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 8. С. 111–117.
12. Пестов В. В. Методика формирования сепарационного параметра для рентгенофлуоресцентной сепарации руд и техногенных материалов // Горный журнал. 2012. № 2. С. 145–150.
13. Цыпин Е. Ф., Тююшева Н. М., Комлев С. Г., Аржанников Г. И., Беляков В. А., Карбовская А. В. Рентгенорадиометрическая сепарация медно-цинковых руд // Цветные металлы. 1992. № 12. С. 58–61.
14. Санакулов К. С., Руднев С. В., Канцель А. В. О возможности отработки месторождения «Учкулач» с использованием технологии рентгенорадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1(44). С. 17–20.
15. Санакулов К. С., Руднев С. В. Комплекс рентгенорадиометрического обогащения сульфидных руд месторождения «Жоқпатас» // Горный вестник Узбекистана. 2010. № 1(40). С. 3–7.
16. Рахмеев Р. Н., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О., Чикин А. Ю. Результаты испытаний рентгенорадиометрического сепаратора для обогащения алмазосодержащих концентратов // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 80–88.
17. Цыпин Е. Ф., Шемякин В. С., Скопов С. В., Федоров Ю. О., Пестов В. В., Ентальцев Е. В. Обогащение минерального и техногенного сырья с использованием рентгенорадиометрической сепарации // Сталь. 2009. № 6. С. 75–78.
18. Колесаев В. Б., Корсаков А. К., Святецкий В. С., Литвиненко В. Г., Култышев В. И., Решетников А. А. Подземная разработка урановых месторождений Стрельцовского рудного поля // Горный журнал. 2008. № 8. С. 33–36.

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. Зверев В. В., Литвинцев Э. Г., Рябкин В. К., Гусев С. С., Кузнецова О. В., Глушко Т. В., Ратнер В. Б., Рябкина З. П. Радиометрическая сепарация как основной процесс в технологической схеме обогащения минерального сырья // Обогащение руд. 2001. № 5. С. 3–6.

21. Шемякин В. С., Макаров Н. М., Чепчугов С. А. Возможности обогащения бокситов СУБРа // Горный журнал. 2004. № 3. С. 35–38.

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

Поступила в редакцию 12 июля 2018 года

Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Елизаров Д. Б., Овчинникова Т. Ю. Связь показателей рентгенорадиометрической сепарации с крупностью сортируемых классов // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 77–84.

### Сведения об авторах:

**Цыпин Евгений Федорович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

**Ефремова Татьяна Александровна** – младший научный сотрудник АО «Уралмеханобр». E-mail: efremova\_ta@umbr.ru

**Елизаров Дмитрий Борисович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры бизнес-информатики Уральского государственного экономического университета. E-mail: elizarovdb@yandex.ru

**Овчинникова Татьяна Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tt2979@yandex.ru

## CONNECTION BETWEEN X-RAY RADIOMETRIC SEPARATION INDICATORS AND THE SIZE OF SORTED FRACTIONS

Tsy-pin E. F.<sup>1</sup>, Efremova T. A.<sup>2</sup>, Elizarov D. B.<sup>3</sup>, Ovchinnikova T. Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

<sup>2</sup> AO Uralmexhanobr, Ekaterinburg, Russia.

<sup>3</sup> Ural State Economical University, Ekaterinburg, Russia.

**Research subject and aim.** The method of X-ray radiometric separation using surface indicators of separation requires observance of certain processing methods of preparing raw material for separation, especially singling out the sorted fractions out of the initial material. Various distributions of mineral phases lump content, separated lumps mineralization character, the applied geometry of measuring X-ray characteristics of lumps during separation, and correlation between material granulometric characteristics parameters and measuring system elements influence the effectiveness of separation when setting the borders of the sorted fractions. The aim of the research is to investigate into the influence of the sorted fractions borders and the quantity of these fractions under various distributions of mineral phases lump content in the raw material on the effectiveness of separation.

**Methodology.** In order to get common regularities in the connections between raw material characteristics and the sorted fractions required borders, simulation model is used which considers granulometric composition, distribution of mineral phases content in ore lumps, the characteristics of an ultimate separator and allowing to forecast separation technological characteristics.

**Research results and application area.** Partition curves for various sorted grain-size fractions and density of distribution of mineral phases content in ore lumps are the simulation results. If actual raw material is assigned to any type of the list of examined at simulation, the forecasts of separation technological indices under various borders of the sorted fractions can be carried out, and the required number and borders of the sorted fractions can be chosen.

**Conclusions.** The character of lump distribution of mineral phases content influences the effectiveness of separation and the possibility of obtaining poor tailings under various width of the sorted fractions. During scheme development (sorted fractions number and the borders selection) the character of lump distribution of mineral phases content should be taken into account.

**Key words:** preliminary concentration; X-ray radiometric separation; number of sorted fractions; simulation model; distribution of mineral phases content in ore lumps; partition curves.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-77-84

### REFERENCES

1. Maksimov I. I. [The 27th International Mineral Processing Congress (part 1)]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 2015, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.)

2. Maksimov I. I. [The 27th International Mineral Processing Congress (part 2)]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 2015, no. 6, pp. 50–58. (In Russ.)
3. Härkki K. Overcoming sustainability challenges of future concentrator plants. Proc. of XXVII Int. Min. Proc. Congress, Santiago, Chile, Gecamin, 2014, chap. 1, p. 51.
4. Tsylin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Elizarov D. B. [A cluster of information methods of mineral processing]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2017, special edition no. 23, pp. 483–492. (In Russ.)
5. Knapp H., Neubert K., Wotruba H. Simulation of sensor-based on drill core analysis. Proc. of the XXVII Int. Min. Congress, Santiago, Chile, 2014, chap. 16, pp. 21–30.
6. Kolacz J. Sensor based sorting with signal pattern recognition: The new powerful tool in mineral processing. Proc. of the XXVII Int. Min. Congress, Santiago, Chile, 2014, chap. 16, pp. 106–115.
7. Robben C., Mosser A. X-ray-transmission-based sorting at the Mittersill tungsten mine. Proc. of the XXVII Int. Min. Congress, Santiago, Chile, Gecamin, 2014, chap. 16, pp. 159–168.
8. Kobzev A. S. [Development trends and problems of radiometric methods of mineral processing]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2013, no. 1, pp. 13–17. (In Russ.)
9. Fedorov Iu. O., Katsler I. U., Korenev O. V., Korotkevich V. A., Tsoi V. P., Kovalev P. I., Fedorov M. Iu., Popovskii N. S. [Experience and practice of X-ray radiometric separation of ores]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2005, no. 5, pp. 21–37. (In Russ.)
10. Fedorov M. Iu. [New technical developments to ensure the increase of effectiveness in equipment and technology with the use of X-ray fluorescence separation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 8, pp. 103–110. (In Russ.)
11. Pestov V. V. [The development and use of methodical software X-ray fluorescent separation of mineral and technogenic raw materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 8, pp. 111–117. (In Russ.)
12. Pestov V. V. [A methodology of developing separation parameter for X-ray fluorescent separation of ores and technogenic materials]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2012, no. 2, pp. 145–150. (In Russ.)
13. Tsylin E. F., Tiuiusheva N. M., Komlev S. G., Arzhannikov G. I., Beliakov V. A., Karbovskaia A. V. [X-ray radiometric separation of copper-zinc ores]. *Tsvetnye metally – Non-ferrous Metals*, 1992, no. 12, pp. 58–61. (In Russ.)
14. Sanakulov K. S., Rudnev S. V., Kantsef' A. V. [On the possibility of mining Uchkulach deposits with the use of lead-zinc ore X-ray radiometric processing technology]. *Gornyi vestnik Uzbekistana – Mining News of Uzbekistan*, 2011, no. 1(44), pp. 17–20.
15. Sanakulov K. S., Rudnev S. V. [A complex of X-ray radiometric processing of sulphide ores at Kokpatas deposit]. *Gornyi vestnik Uzbekistana – Mining News of Uzbekistan*, 2010, no. 1(40), pp. 3–7.
16. Rakhmiev R. N., Voiloshnikov G. I., Fedorov Iu. O., Chikin A. Iu. [Results of the experiments over the X-ray radiometric separator for diamond-bearing concentrates processing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 5, pp. 80–88. (In Russ.)
17. Tsylin E. F., Shemiakin V. S., Skopov S. V., Fedorov Iu. O., Pestov V. V., Ental'tsev E. V. [Processing mineral and technogenic raw material with the use of X-ray radiometric separation]. *Stal' – Steel*, 2009, no. 6, pp. 75–78. (In Russ.)
18. Kolesaev V. B., Korsakov A. K., Sviatetskii V. S., Litvinenko V. G., Kultyshev V. I., Reshetnikov A. A. [Strel'tsovsky orefield uranium deposits underground mining]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2008, no. 8, pp. 33–36. (In Russ.)
19. Shemiakin V. S., Skopov S. V., Man'kovskii R. V., Krasil'nikov P. A., Mamonov R. S. [Preliminary concentration of quartz raw material]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 8, pp. 74–79. (In Russ.)
20. Zverev V. V., Litvintsev E. G., Riabkin V. K., Gusev S. S., Kuznetsova O. V., Glushko T. V., Ratner V. B., Riabkina Z. P. [Radiometric separation as a basic process in the flowsheet of mineral processing]. *Obogashchenie rud – Mineral Processing*, 2001, no. 5, pp. 3–6. (In Russ.)
21. Shemiakin V. S., Makarov N. M., Chepchugov S. A. [Possibility of processing the bauxites of the NUBR]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2004, no. 3, pp. 35–38. (In Russ.)
22. Alushkin I. V., Shchipchin V. B., Korneev I. G. [X-ray radiometric separation from TOMRA Sorting for coal preliminary processing]. *Ugol' – Coal*, 2014, no. 5, pp. 100–103. (In Russ.)

### Information about authors

**Tsylin Evgenii Fedorovich** – Doctor of Engineering sciences, Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

**Efremova Tat'iana Aleksandrovna** – junior researcher of AO Uralsmektanobr. E-mail: efremova\_ta@umbr.ru  
**Elizarov Dmitrii Borisovich** – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, associate professor of the Department of Business Informatics, Ural State Economical University. E-mail: elizarovdb@yandex.ru

**Ovchinnikova Tat'iana Iur'evna** – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, associate professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tt2979@yandex.ru