

Повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья

В.Ф. Монастырский*, И.А. Макалин**

**Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова, 678170, Мирный, ул. Тихонова, 5/1, Россия*

***Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Мирный, ул. Ленина, д. 39, Россия
e-mail: vfmon@mail.ru, makalin2004@rambler.ru*

Аннотация. Изложены пути повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья на предприятиях АК «АЛРОСА». Рассмотрены вопросы обоснования различных режимов работы рентгенолюминесцентных сепараторов (порогового и селективного). На основании данных статистической обработки выборок алмазов из концентратов и хвостов сепараторов, эксплуатируемых в условиях обогащательных фабрик АК «АЛРОСА», научно обосновано, что наиболее эффективным критерием разделения алмазосодержащего сырья на концентрат и хвосты является автокорреляционная функция (свертка). Установлены значения свертки, при которой достигаются оптимальные показатели обогащения методом рентгенолюминесцентной сепарации, доказана эффективность разработанных рекомендаций.

Ключевые слова: сепаратор, люминесценция, кристалл, интенсивность, обогащение, разделение, эффективность, рекомендация, свертка, компонента.

Improvement of the Effectiveness of X-Ray Luminescent Separation of Diamond-Bearing Raw Materials

V.F. Monastyrskiy*, I.A. Makalin**

**Polytechnic Institute (subsidiary), North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov,
5/1, Tikhonov Str., Mirny, 678170, Russia*

***«Yakutnioproalmaz» Institute «ALROSA» Co. Ltd, 39, Lenina Str., Mirny, 678174, Russia
e-mail: vfmon@mail.ru, makalin2004@rambler.ru*

Abstract. The article describes how to improve X-ray fluorescent separation of diamond-bearing raw materials at the enterprises of JSC «ALROSA». The questions of substantiation of different operating modes of X-ray luminescent separators (threshold and selective) are considered. On the basis of statistical processing of the diamonds samplings from concentrates and tails of the separators operated in the conditions of the concentrating factories of ALROSA, it is established that the most effective criterion for separation of diamond-bearing raw materials into concentrate and tails is the autocorrelation function (convolution). The convolution values are found at which the optimum enrichment rates are achieved by X-ray luminescence separation. The effectiveness of the developed recommendations is proved.

Key words: separator, luminescence, crystal, intensity, enrichment, separation, effectiveness, recommendation, package, component.

Введение

В статье изложены пути повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья на предприятиях АК

«АЛРОСА». Рассмотрены вопросы обоснования порогового и селективного режимов работы рентгенолюминесцентных сепараторов (РЛС) производства НПП «Буревестник». На основании данных статистической обработки выборок алмазов из концентратов сепараторов, эксплуатируемых в условиях обогащательных фабрик АК «АЛРОСА», научно обосновано, что наиболее эффективным критерием разделения алма-

МОНАСТЫРСКИЙ Виталий Федорович – д.т.н., проф.; МАКАЛИН Игорь Александрович – к.т.н., инженер-обогащатель.

зосодержащего сырья на концентрат и хвосты является автокорреляционная функция (свёртка) сигнала люминесценции [1]. Установлены значения свёртки, при которой достигаются оптимальные показатели обогащения методом рентгенолюминесцентной сепарации. Промышленными испытаниями сепараторов различной конструкции, аналого-цифровой блок регистрации алмазов которых настроен по значению свёртки $Sv=0,1-1$, доказана эффективность разработанных рекомендаций.

На предприятиях АК «АЛРОСА» обогащение алмазосодержащего сырья выполняют различными методами: гравитационным, флотационным, рентгенолюминесцентным и адгезионным. Как свидетельствует опыт их применения на обогатительных фабриках, наиболее прогрессивным и эффективным среди них, особенно для крупных кристаллов, является метод, в основу которого в качестве разделительного признака положена интенсивность люминесценции алмазов при действии на них рентгеновских лучей.

Материалы и методы

Исследованиями процессов, происходящих в рентгенолюминесцентных сепараторах [2], установлено, что эффективность их применения на обогатительных фабриках различных месторождений существенно зависит от многих факторов. Среди них важнейшими являются следующие:

- технологические (люминесценция алмазов и сопутствующих минералов в рабочей зоне сепаратора, вещественный состав сырья, контрастность свойств алмазов и сопутствующих минералов, конструкция тракта регистрации сепаратора, динамический диапазон сигналов алмазов в рабочей зоне РЛС, скорость транспортирования алмазосодержащего сырья, коэффициент заполнения лотка сепаратора);
- горнотехнические (крупность ценного компонента, гранулометрический состав алмазосодержащего сырья, абразивность, крепость минералов);
- технические (производительность сепаратора, энергоёмкость разделения минералов, расход воды);
- эргономические (запыленность, морозоопасность, виброопасность).

Для исследования взаимосвязи между факторами и извлечением алмазов из алмазосодержащей руды методом рентгенолюминесцентной сепарации было отобрано 18 факторов, из которых выделили значимые в следующей последовательности:

- из указанного объема факторов отбирали те, которые наилучшим образом отражают специфику работы РЛС в условиях предприятий АК «АЛРОСА»;

- методом экспертной оценки специалистами горных предприятий, НИИ, вузов, конструкторских бюро заводов и проектных институтов по опросным листам или путем анализа литературных источников выбирали значимые;

- уточняли число значимых факторов методом корреляционного анализа;

- минимизировали количество факторов по значимости добытой информации с учетом достоверности.

Для выполнения корреляционного анализа было отобрано 5 факторов (интенсивность люминесценции алмазов и сопутствующих минералов, контрастность их физических свойств, гранулометрический состав алмазосодержащего сырья, крупность ценного компонента и условия эксплуатации), значимость которых определялась по данным эксплуатации сепараторов в условиях обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» на базе 300 выборок фактор-параметров.

Заданием корреляционного анализа было определить внутреннюю взаимосвязь между значимыми факторами и извлечением алмазов и сопутствующих минералов в концентрат сепараторов. Результаты исследований показали, что наиболее тесная связь существует между интенсивностью люминесценции и извлечением алмазов, которая характеризуется коэффициентом корреляции 0,75–0,8, тогда как значения остальных коэффициентов парной и множественной корреляции не превосходят 0,55.

Для обоснования адекватной модели взаимосвязи между интенсивностью люминесценции и извлечением алмазов и сопутствующих минералов в концентрат были отобраны выборки интенсивности люминесценции алмазов из концентратов сепараторов обогатительных фабрик при обработке руды трубок «Юбилейная», «Удачная», «Интернациональная», «Комсомольская» и «Архангельская».

Статистическая обработка по методике [3] позволила получить данные для построения функции распределения интенсивности люминесценции алмазов (рис. 1) и определения значений математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения случайной величины интенсивности люминесценции алмазов и сопутствующих минералов.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что интенсивность люминесценции алмазов существенно зависит от особенностей залегания месторождения и наличия в алмазосодержащей руде слаболюминесцирующих алмазов. Установлено, что наименьшее количество слаболюминесцирующих алмазов находится в трубке

«Интернациональная», где чувствительность рентгенооптической системы сепараторов настраивалась по разделительному признаку (сигналу люминесценции) на уровень не менее 0,01 мкА ($5,0 \cdot 10^{-12}$ Вт/ср/(Р/с)). Для алмазосодержащего сырья трубок «Комсомольская», «Юбилейная» и «Удачная» чувствительность системы была на уровне 0,002 мкА ($1,0 \cdot 10^{-12}$ Вт/ср/(Р/с)).

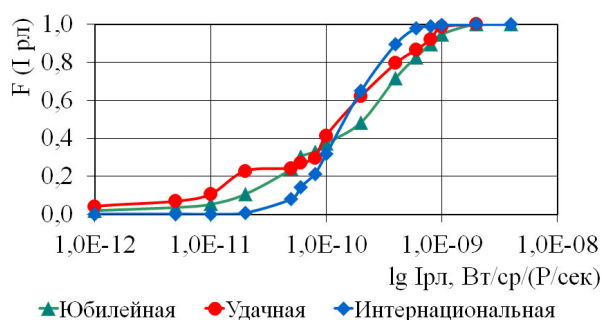


Рис. 1. Функции распределения интенсивности люминесценции алмазов

Основные характеристики случайного процесса изменения интенсивности люминесценции алмазов позволили определить амплитуду порогового режима работы сепараторов из условия нормального закона распределения случайной величины интенсивности люминесценции и минимального $A_{\min}$ или максимального $A_{\max}$ ее значений:

$$A_{\max} = \bar{m} + 3\delta ;$$

$$A_{\min} = \bar{m} - 3\delta ,$$

где $\bar{m}$, δ – соответственно математическое ожидание интенсивности люминесценции и среднеквадратическое значение.

Расчетные данные порогового режима были опробованы в промышленных условиях при настройке рентгенооптической системы сепараторов ЛС-20-05. Несмотря на то, что при настройке сепараторов совершенствовались

способы регистрации алмазов (амплитудный, амплитудно-временной, облучение и регистрации с двух сторон) извлечение алмазов в концентрат повышалось очень медленно, а сопутствующие минералы, которые имели характеристики интенсивности люминесценции выше порогового, продолжали извлекаться в концентрат.

Возникла необходимость перейти от характеристик случайного процесса изменения интенсивности люминесценции алмазов (пороговый режим) к критериям, которые более полно воспроизводят процесс разделения алмазосодержащего сырья на концентрат и хвосты (селективный режим). За основу критерия была принята гипотеза, что абсцисса точки пересечения кривых распределений вероятностей случайной величины люминесценции ценного компонента и сопутствующих минералов при наложении их друг на друга указывает на значение характеристики случайного процесса, при которой происходит оптимальное разделение алмазосодержащего сырья на концентрат и хвосты по признаку интенсивности люминесценции.

В качестве критериев разделения алмазосодержащего сырья по признаку интенсивности люминесценции были приняты следующие характеристики случайного процесса изменения распределения интенсивности люминесценции алмазов и сопутствующих минералов: отношения компонент K , времени затухания τ , автокорреляционных функций свертки S_V и интенсивности люминесценции $I_{рл}$. Выборки указанных характеристик формировались по данным эксплуатации РЛС в условиях обогащательных фабрик Айхальского, Удачинского, Мирнинского и Ломоносовского ГОКов. Обработка статистических данных выполнялась по методикам [4]. Алмазы из концентрата сепараторов были представлены прозрачными кристаллами ювелирного качества (рис. 2, а), а из хвостовых продуктов – в основном темными непрозрачными кристаллами типа «карбонадо» и «борт»

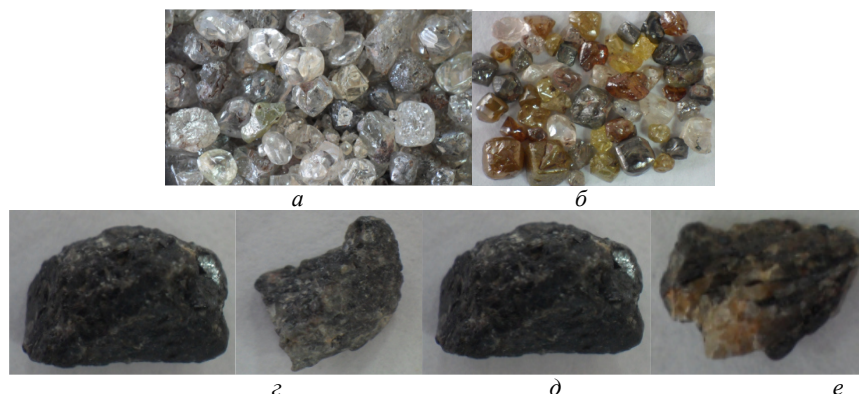


Рис. 2. Алмазы и сопутствующие минералы: а–б – алмазы, извлеченные соответственно из концентратов и хвостов сепараторов; в–е – сопутствующие минералы соответственно плагиоклаз, анортозит, кальцит с включением алмаза и кальцит

(рис. 2, б). Сопутствующие минералы, имеющие схожие с алмазами характеристики люминесценции, были представлены плагиоклазом, анортозитом, кальцитом и другими (рис. 2, в–е) фабрики № 1 Ломоносовского ГОКа.

Результаты исследований по выборкам алмазосодержащего сырья трубки «Архангельская» представлены на рис. 3–6, где точки пересечения кривых распределений случайных величин характеризуют оптимальные значения критериев разделения сырья на концентрат и хвосты равные соответственно:

- для интенсивности люминесценции $I_{PL} = 0,0035$ мкА ($1,75 \cdot 10^{-12}$ Вт/ср/(Р/с));
- для автокорреляционной функции (свертки) $S_V = 0,31$;
- для отношения компонент $K = 2,4$;
- для времени затухания сигнала люминесценции $\tau = 1,4$ мс.

Для выбора наиболее эффективного критерия в промышленных условиях были проведены технологические испытания сепараторов, для которых параметры настройки аналого-цифрового блока регистрации были приняты по результатам исследований. Анализ полученных результатов показал, что в области изменения значений критериев наблюдаются следующие показатели обогащения алмазосодержащего сырья:

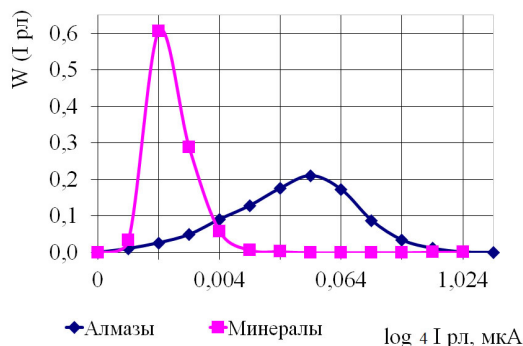


Рис. 3. Распределение интенсивности люминесценции алмазов и сопутствующих минералов

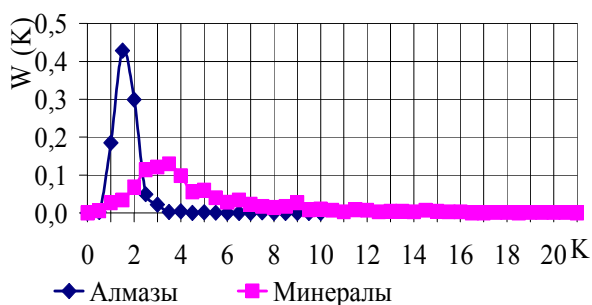


Рис. 5. Распределение отношения компонент люминесценции алмазов и сопутствующих минералов

- свёртки $S_V = 0,31$ потери алмазов составляют 8%, сокращение сопутствующих минералов – 92%;

- интенсивности люминесценции $I_{PL} = 0,0035$ мкА ($1,75 \cdot 10^{-12}$ Вт/ср/(Р/с)) потери алмазов составляют 8,5%, сокращение сопутствующих минералов – 93%;

- отношения компонент $K = 2,4$ потери алмазов составляют 8,5%, сокращение сопутствующих минералов – 86,5%;

- времени затухания сигнала люминесценции $\tau = 1,4$ мс, при котором потери алмазов составляют 18%, сокращение сопутствующих минералов – 46%.

Кривые распределений рентгенолюминесцентных свойств алмазов и сопутствующих минералов, определённые с применением критериев: свёртки, отношения компонент, интенсивности сигнала люминесценции и времени его затухания, пересекаются в точках, в которых значение параметра соответствующего критерия указывает на минимальный выход сопутствующих минералов в концентрат, но наблюдаются значительные потери алмазов.

Для более полного извлечения алмазов до 98,72% сепараторами чувствительность рентгенооптической системы должна быть установлена на уровне не менее 0,0005 мкА ($2,5 \cdot 10^{-13}$ Вт/ср/(Р/с)), ранее действующий порог разделения

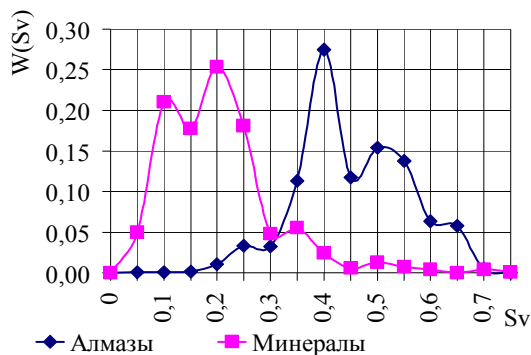


Рис. 4. Распределение свёртки сигнала люминесценции алмазов и сопутствующих минералов

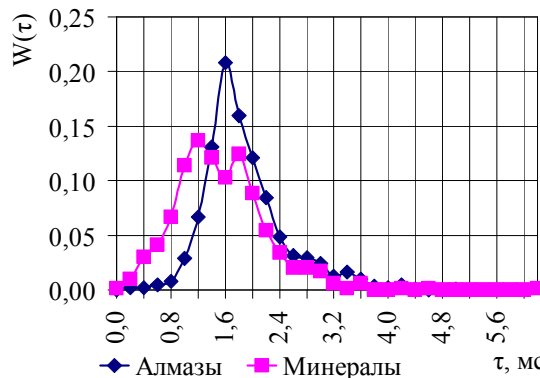


Рис. 6. Распределение времени затухания люминесценции алмазов и сопутствующих минералов

ния 0,001 мкА ($5,0 \cdot 10^{-13}$ Вт/ср/(Р/с)) позволял работать сепараторам в пороговом режиме с извлечением алмазов до 97,68%.

Практически по всем показателям настройки сепараторов наиболее эффективным оказался критерий свертки, область наилучших значений которого определялась из условия нормального закона распределения случайной ее величины.

Выполненные статистические исследования для выборок минералов трубок «Удачная», «Юбилейная», «Интернациональная», «Комсомольская» показали, что область оптимальных значений свертки лежит в пределах $S_v=0,1-1,0$.

Промышленные испытания сепараторов ЛС-20-05-2М, ЛС-ОД-50-03Н, ЛС-Д-4-03Н, ЛС-ОД-6 выполнялись в условиях фабрики № 3 Мирнинского ГОКа, фабрик № 8 и № 14 Айхальского ГОКа. По результатам испытаний было доказано, что при настройке аналого-цифрового блока сепараторов по критерию свертки в области $S_v=0,1-1,0$ извлечение алмазов составляет 98,5% (алмазы трубки «Комсомольская») и 98,8% (алмазы трубки «Юбилейная»).

Заключение

Таким образом, на основании выполненных исследований и промышленной проверки разработанных рекомендаций доказано, что наилучшим критерием разделения алмазосодержащего сырья по признаку интенсивности люминесценции является свертка, область оптимальных значений которой лежит в пределах $S_v = 0,1-1,0$. При этом в промышленных условиях обогаще-

ния алмазосодержащего сырья по признаку разделения по критерию свертки повышается эффективность извлечения алмазов и сокращается выход сопутствующих минералов в концентрат.

Научно обоснованный алгоритм принятия решения о выделении алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья по свертке сигнала люминесценции был предложен для сепараторов нового поколения. Внедрение разработанных рекомендаций на фабрике № 14 АК «АЛРОСА» позволило повысить извлечение алмазов на 0,2% и получить экономический эффект свыше 10 млн. руб. в год.

Литература

1. Владимиров Е.Н., Казаков Л.В., Пахомов М.О., Райзман В.Ш., Шлюфман Е.М. Способ разделения минералов по их люминесцентным свойствам и способ определения порога разделения // Патент РФ № 2271254. Бюл. №7. 2006.
2. Монастырский В.Ф., Макалин И.А. Обоснование критериев частоты следования люминесцентных минералов в рентгенолюминесцентных сепараторах // Обогащение полезных ископаемых: Научно-технический сборник. Днепропетровск: НГУ, 2011. Вып. 44. С. 108–113.
3. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е издание. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.

Поступила в редакцию 06.11.2016