

кварцевой стадии — 39—84 МПа и 152—320 °С. Таким образом, повышение давления и температуры от ранней метасоматической стадии к поздним жильным стадиям со свободным видимым золотом могло быть связано с проявлением гидротермального процесса более поздней тектоно-магматической активизации. Минералообразование происходило из натриевых хлоридных растворов, в которых присутствовали K^+ и Mg^{2+} в различных соотношениях. По-видимому, в минералообразовании участвовали также растворы существенно калиевого и магниево-хлоридного составов. Концентрации растворов варьируют от нескольких процентов до практически рассолов [5].

Это явление мы связываем с влиянием присутствующих на площади развития оруденения фидоровского типа вторичных малоглубинных магматических очагов.

Зональное изменение состава золотобраннеритового оруденения не свойственно основным рудо-

носным зонам Эльконского горста. Смена состава оруденения вблизи контакта многофазных мезозойских интрузий в ореоле сопровождающей их фенизации определило появление здесь особого золотоносного сфен-уранинитового типа оруденения (зона Интересная). Его формирование мы связываем с влиянием располагавшегося здесь малоглубинного магматического очага и проявлением в период рудообразования иного термодинамического режима.

Предложенная металлогеническая модель Центрально-Алданского рудного района, положенные в ее основу выявленные прогнозно-поисковые признаки типов оруденения могут являться надежной основой для постановки дальнейших работ и открытия новых месторождений в данном, а также в аналогичных рудных районах.

Работа выполнена в рамках тематического плана Министерства образования и науки при финансовой поддержке РФФИ грант 05-05-64041.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бавлов В.Н., Бойцов А.В., Головинский С.А. и др. Перспективы освоения и развития сырьевой базы урана России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2005. № 1. С. 16—26.
2. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 4. С. 354—369.
3. Казанский В.И. Уникальный Центрально-Алданский золотоурановый рудный район (Россия) // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 3. С. 195—211.
4. Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях М.: Изд-во. АН СССР, 1953. С. 333—456.
5. Крылова Т.Л., Дорожкина Л.А. Флюидный режим формирования браннерит-серебро-золотого оруденения в зоне Федоровская (Эльконский рудный район) // Известия вузов. Геология и разведка. 2002. № 4. С. 73—79.
6. Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 129—151.

Российский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — Н.Н. Трофимов

УДК 622.725

А.Ф. ТИРМЯЕВ, Ж.М.А. ГАНГА

ПОВЫШЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ АЛМАЗОНОСНЫХ РУД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦИРКОНА

В условиях алмазодобывающей фабрики проведены масштабные исследования кинетики рентгенолюминесценции алмазов и цирконов из месторождения «Катока» (Республика Ангола). Найден контрастный отличительный признак, позволяющий разделить эти минералы в процессе рентгенолюминесцентной сепарации. Предложен новый способ повышения селективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащих материалов, апробированный на практике и внедренный в производство.

Экономическая целесообразность промышленной разработки коренных алмазосодержащих месторождений оценивается целым рядом характеристик объекта, среди которых определяющими являются объем месторождения, запасы алмазов, их среднее содержание в 1 т руды, качество и стои-

мость алмазов. Однако технология обогащения алмазосодержащего сырья даже при самых высоких характеристиках разрабатываемых месторождений связана с переработкой значительных объемов исходной руды, поскольку содержание в ней полезного компонента (алмазов) очень низкое и, как

правило, не превышает $6 \cdot 10^{-5} \%$. В связи с этим технология извлечения алмазов — сложный, многостадийный процесс, условно подразделяемый на первичное обогащение и последующие доводочные операции с помощью рентгенолюминесцентной (РЛ) сепарации.

Обогащение кимберлитов гравитационными методами (отсадка, обогащение в тяжелых суспензиях) позволяет сократить объемы руды в несколько десятков раз, выделив из нее так называемую тяжелую фракцию (ТФ) плотностью более $2,9\text{--}3,0 \text{ г/см}^3$. В результате на переделе обогащения из дальнейшего процесса частично выводится ряд люминесцирующих минералов с невысокой плотностью. Последующим этапом обогащения выделенной ТФ является РЛ сепарация, на которую вместе с алмазами поступают сопутствующие минералы, обладающие высокой плотностью: гранаты (пироп), ильмениты (пикроильменит), пирит, хромшпинелиды, оливины, пироксены. Эти минералы практически не люминесцируют при возбуждении рентгеновским излучением и удельно-отделительно отделяются от алмазов РЛ сепарацией. В то же время ряд сопутствующих минералов (цирконы, плагиоклазы), содержание которых в ТФ, как правило, на порядки превышает концентрацию алмазов, обладают достаточно интенсивной рентгенолюминесценцией, в результате чего значительная их часть наряду с алмазами извлекается РЛ сепараторами. Это приводит к снижению селективности сепарации, увеличению объемов концентратных продуктов, снижению кондиции алмазов в концентратах, росту энергетических затрат: тем самым снижается экономическая эффективность РЛ сепарации.

Алмазоносные руды кимберлитовой трубки «Катока» характеризуются сравнительно высоким содержанием циркона — до 30 т и более [1, 4]. С момента запуска в эксплуатацию обогатительной фабрики ГРО «Катока», в качестве первичного обогащения класса -5 мм использовалась отсадка. В марте 2004 г. была смонтирована установка обогащения в тяжелых средах (ТСУ), на которой до настоящего времени осуществляется доводка концентратов отсадки. В любом из вариантов построения схемы гравитационного обогащения руды циркон извлекается в концентрат, так как его плотность ($4,6\text{--}4,7 \text{ г/см}^3$) выше плотности алмаза. Ввод в эксплуатацию ТСУ, несомненно, повысил эффективность гравитационного обогащения, снизив объемы концентрата в классе -5 мм не менее чем в 3 раза, но одновременно с этим в 4,4 раза возросла концентрация цирконов в исходном питании РЛ сепараторов, где весовое содержание достигает 3,6 %. В результате на стадии доводки концентратов первичного обогащения РЛ сепарацией количество цирконов в ее исходном питании превышает содержание алмазов более чем на два порядка. Как показывает практика эксплуатации, РЛ сепараторы, использующие амплитудно-кинетический метод регистрации, извлекают в концентрат совместно с алмазами около 10–15 % цирконов исходного питания.

Цель данной работы — определение причин попадания цирконов в концентрат сепараторов на основе исследования кинетики люминесценции алмазов и цирконов, поиск путей повышения контрастности разделительного признака этих минералов, а также возможность повышения эффективности РЛ сепарации алмазов при использовании более контрастного признака разделения.

Экспериментальные исследования кинетики рентгенолюминесценции алмазов и цирконов

Для повышения селективности извлечения алмазов в современных отечественных РЛ сепараторах, работающих на импульсном рентгеновском излучении, реализован амплитудно-кинетический способ сепарации, использующий в качестве разделительного признака минералов кинетику их люминесценции. Селекция минералов производится по регистрации амплитуды затухающей медленной компоненты свечения спустя некоторое время после окончания возбуждающего импульса, обычно спустя 1,5–2 мкс. Считается, что люминесценция сопутствующих минералов, в том числе цирконов, не обладающих длительными компонентами свечения, за это время затухнет, и эти минералы не будут извлечены в концентрат [2, 3]. Однако при обогащении руд с высоким содержанием циркона, в частности, алмазоносных руд кимберлитовой трубки «Катока», селективность известных способов сепарации недостаточна, поскольку, как отмечалось выше, около 10–15 % цирконов, содержащихся в руде, обладают весьма интенсивной люминесценцией, превышающей интенсивность люминесценции алмазов (рис. 1). Таким образом, повышение селективности РЛ сепарации — весьма актуально, особенно это требуется на доводочных операциях, где необходимо обеспечить максимально возможную кондицию продукта по содержанию алмазов.

В целях решения поставленной задачи на обогатительной фабрике ГРО «Катока» были проведены исследования по изучению основных факторов и причин, влияющих на селективность РЛ сепарации. На специализированной стендовой установке

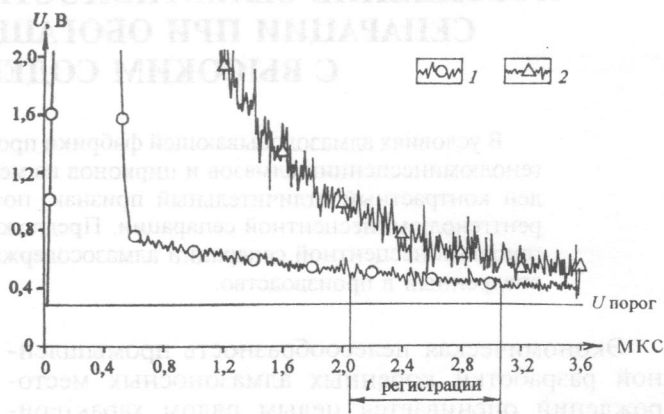


Рис. 1. Амплитудно-кинетический метод сепарации: регистрация алмаза (1) и циркона (2) по амплитуде затухания медленной компоненты, превышающей пороговое значение

оперативного контроля (УОК-1) (производство ОАО НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург), в течение длительного периода времени была все-сторонне исследована кинетика люминесценции нескольких десятков тысяч кристаллов алмазов и цирконов крупностью $-5,0+2,0$ мм и $-2,0+1,4$ мм. Причем эти минералы были специально отобраны для исследований из разных продуктов обогащения — концентратов и хвостов РЛ сепарации, т. е. изученные выборки включали также группы слаболюминесцирующих образцов. Установка позволяет одновременно измерять шесть параметров кинетики рентгенолюминесценции исследуемого кристалла: интенсивности быстрой и медленной компонент, а также постоянные времени затухания в режимах люминесценции и абсорбции. Одновременно данные исследований на установке УОК-1 сопоставлялись с параметрами процессов люминесценции минералов, происходящих в реальных режимах работы сепараторов при импульсном рентгеновском облучении.

В результате исследований люминесценции цирконов под импульсами рентгеновского излучения в сепараторе установлены причины попадания цирконов в концентрат:

1. Диапазон изменчивости интенсивности люминесценции цирконов от кристалла к кристаллу выше, чем у алмазов, и составляет более трех порядков.

2. Чем интенсивнее люминесценция циркона в момент импульса рентгеновского облучения, тем выше вероятность регистрации амплитудно-кинетическим методом сепарации.

3. Быстрая компонента люминесценции циркона длительнее, чем быстрая компонента в люминесценции алмаза: затухает с постоянной времени около 60 мкс. Медленных компонент затухания выделяют, как минимум, две: с постоянными времени 0,3—0,4 и 0,9—3,5 мкс, что соизмеримо с постоянными времени затухания алмазов. Причем у цирконов с высокой интенсивностью люминесценции постоянная времени затухания медленной компоненты достигает значений 20—25 мкс.

Таким образом, в силу выше названных причин признак разделения, основанный на регистрации амплитуды медленной компоненты свечения, не обеспечивает эффективную селекцию алмазов от цирконов, т. е. отличительный признак, выделенный по различиям амплитуд медленной компоненты свечения этих минералов, недостаточно контрастен.

По данным измерений, проведенных на УОК-1, построены функции интегрального распределения алмазов и цирконов класса крупности $-5,0+2,0$ мм по интенсивности их медленной компоненты в режиме абсорбции (т. е. люминесценции, регистрируемой со стороны, противоположной рентгеновскому излучению) (рис. 2).

Показатели функций распределения подтверждаются экспериментальными данными, полученными в процессе эксплуатации сепаратора ЛС-Д-4-04А (производство ОАО НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург), работающего на обога-

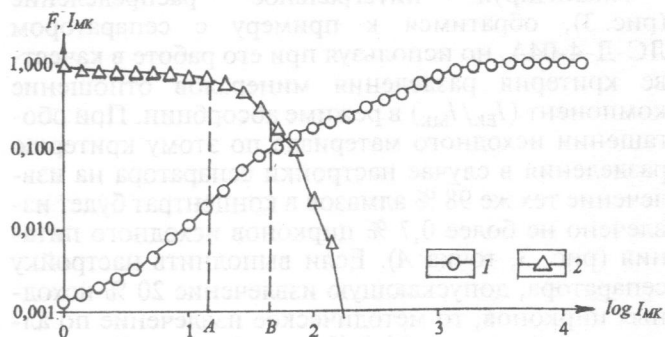


Рис. 2. Интегральное распределение алмазов (1) и цирконов (2) класса $-5,0+2,0$ мм по интенсивности медленной компоненты абсорбции

тительной фабрике ГРО «Катока» в схеме доводки сухого материала класса $-5,0+2,0$ мм. Принимая за критерий разделения минералов уровень интенсивности медленной компоненты абсорбции, в случае настройки сепаратора на регистрацию интенсивности медленной компоненты, обеспечивающую извлечение 98 % алмазов, с равной вероятностью в концентрат будут извлечены около 60 % цирконов, содержащихся в его исходном питании (рис. 2, точка А). Стремление повысить кондицию концентрата требует снижения чувствительности сепаратора, например, до уровня, позволяющего регистрировать не более 20 % исходных цирконов (рис. 2, точка В). Однако это приведет к возрастанию методических потерь извлечения алмазов на недопустимо большую величину 9—9,5 %.

При анализе результатов исследований кинетики люминесценции цирконов и алмазов был выявлен более контрастный отличительный признак этих минералов, основанный на соотношении интенсивностей быстрой и медленной компонент. Графики функций интегрального распределения алмазов и цирконов по отношению интенсивности их суммарной (быстрая + медленная) компоненты к интенсивности медленной компоненты абсорбции демонстрируют наличие характерного диапазона с минимальным перекрытием распределений (рис. 3).

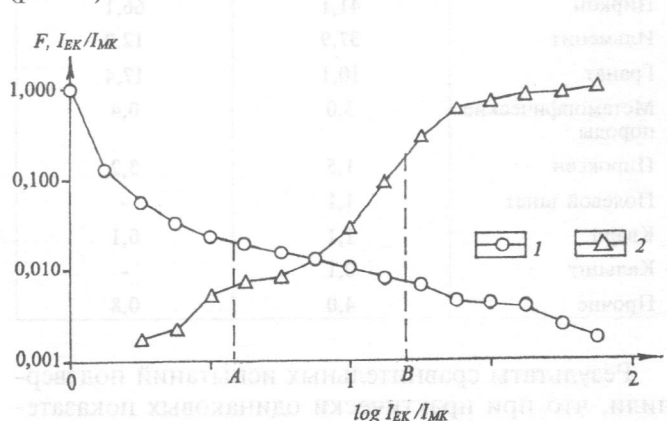


Рис. 3. Интегральное распределение алмазов (1) и цирконов (2) класса $-5,0+2,0$ мм по отношению интенсивности суммарной (быстрой + медленной) компоненты $I_{эк}$ к интенсивности медленной компоненты абсорбции $I_{мк}$

Извлечение цирконов при различных методах регистрации

Первичное обогащение	Весовое содержание в исходном питании ЛС-Д-4-04А, %		Извлечение цирконов в концентрат ЛС-Д-4-04А, %	
	алмазы	цирконы	амплитудно-кинетический метод	метод регистрации по отношению компонент
Отсадка	0,015	0,7	59,8	5,8
ТСУ	0,024	2,9	59,7	4,4

Анализируя интегральное распределение (рис. 3), обратимся к примеру с сепаратором ЛС-Д-4-04А, но используя при его работе в качестве критерия разделения минералов отношение компонент ($I_{ЕК}/I_{МК}$) в режиме абсорбции. При обогащении исходного материала по этому критерию разделения в случае настройки сепаратора на извлечение тех же 98 % алмазов в концентрат будет извлечено не более 0,7 % цирконов исходного питания (рис. 3, точка А). Если выполнить настройку сепаратора, допускающую извлечение 20 % исходных цирконов, то методическое извлечение по алмазам возрастет до 99,3 % (рис. 3, точка В).

В производственных условиях в течение длительного периода эксплуатации проведены многократные сравнительные испытания сепаратора ЛС-Д-4-04А при его работе в различных вариантах: по амплитудно-кинетическому методу (регистрация интенсивности медленной компоненты); по методу регистрации отношения компонент.

Сравнительные испытания проводились как до внедрения ТСУ на стадии первичного обогащения класса -5,0+2,0 мм, так и после ввода ее в эксплуатацию. Во время испытаний определялся минеральный состав хвостовых продуктов сектора окончательной доводки (табл. 1), где производилась ручная разборка концентратов и хвостов сепаратора ЛС-Д-4-04А. С целью выявления люминесцирующих фракций, присутствующих в исходном питании сепаратора, на установке УОК-1 измерялись параметры люминесценции всех групп сопутствующих минералов, попавших в его концентраты и хвосты сепарации. Результаты измерений показали, что из всех групп минералов только циркон имеет достаточно интенсивную люминесценцию, соизмеримую с люминесценцией алмазов, прочие группы минералов практически не люминесцируют.

Таблица 1

Минеральный состав хвостов сектора окончательной доводки

Минерал	Весовая доля, %	
	до внедрения ТСУ	после внедрения ТСУ
Циркон	41,1	66,1
Ильменит	37,9	12,0
Гранат	10,1	17,4
Метаморфические породы	3,0	0,4
Пироксен	1,5	3,2
Полевой шпат	1,1	-
Кварц	1,1	0,1
Кальцит	0,1	-
Прочие	4,0	0,8

Результаты сравнительных испытаний подтвердили, что при практически одинаковых показателях извлечения полезного компонента, контрастность разделения алмазов от цирконов по способу регистрации отношения компонент значительно выше (табл. 2).

Из всех цирконов исходного питания, обладающих интенсивной люминесценцией, по способу регистрации отношения компонент в концентрат извлекаются не более 5—6 %, а при амплитудно-кинетическом способе — около 60 %. Более того, изучение кинетики люминесценции цирконов, обнаруженных в концентрате при методе регистрации отношения компонент, показало, что они не регистрируются этим методом, не вызывают неоправданных отсечек, а попадают в концентрат одновременно с отсечками алмазов, оказавшись в зоне воздушной струи пневмоотсекателя.

Техническая реализация метода регистрации по отношению компонент

Для осуществления сепарации минералов по предлагаемому методу разработано, изготовлено и внедрено на промышленных сепараторах новое устройство регистрации и обработки сигналов люминесценции. Сущность его заключается в том, что измеряются интенсивность суммы компонент (быстрая + медленная), а также интенсивность медленной компоненты люминесценции (абсорбции) соответственно в моменты рентгеновского облучения и после задержки на 1,5—2 мкс после окончания импульса рентгеновского излучения. Затем вычисляется отношение интенсивности суммы компонент к интенсивности медленной компоненты люминесценции (абсорбции). Величина отношения сравнивается с заданным пороговым значением и на основании результата сравнения принимается решение о команде на отсечку минерала. Эффективным элементом разработанного устройства регистрации является логарифмический усилитель, позволяющий, с одной стороны, значительно расширить динамический диапазон регистрируемых сигналов до уровня 67 дБ, с другой, наиболее просто реализовать вычисление отношения интенсивностей суммарной и медленной компонент люминесценции (абсорбции), поскольку:

$$\ln(I_{ЕК}/I_{МК}) = \ln(I_{ЕК}) - \ln(I_{МК}),$$

где $I_{ЕК} = (I_{БК} + I_{МК})$ — интенсивность суммы компонент (быстрая + медленная); $I_{БК}$ — интенсивность быстрой компоненты; $I_{МК}$ — интенсивность медленной компоненты.

В момент облучения минерала, движущегося через рентгено-оптическую зону сепаратора, в случае выполнения условия $\ln(I_{ЕК}/I_{МК}) < \ln K$, устройство регистрации выдает команду на отсечку в концентрат. Коэффициент K — это пороговая величина

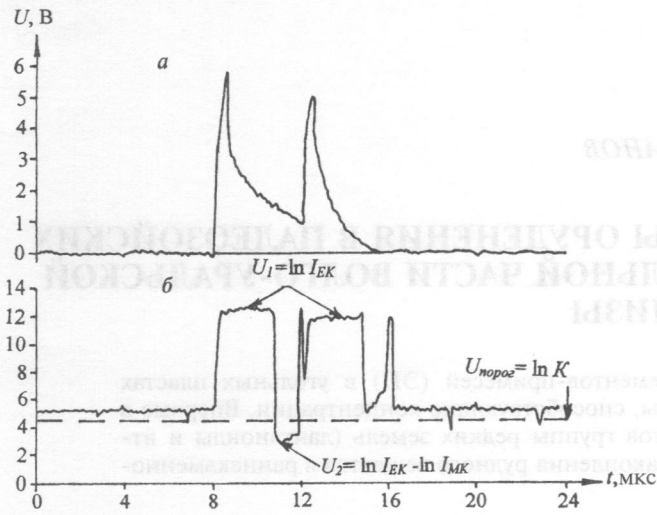


Рис. 4. Осциллограммы сигналов алмаза, пересекающего рентгено-оптическую зону сепаратора ЛС-Д-4-04А: а — усиленный сигнал фотоприемника, б — обработанный логарифм сигнала фотоприемника

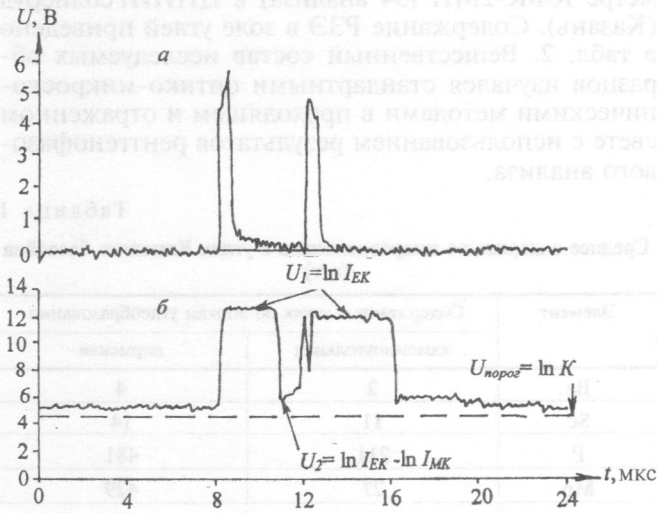


Рис. 5. Осциллограммы сигналов циркона, пересекающего рентгено-оптическую зону сепаратора ЛС-Д-4-04А: а — усиленный сигнал фотоприемника, б — обработанный логарифм сигнала фотоприемника

на отношения компонент, определяющая границу сепарации по этому критерию. Изменяя значения K , можно регулировать и уровень чувствительности сепаратора, и селективность его извлечения по отношению к сопутствующим цирконам (рис. 3).

Типовые осциллограммы сигналов, формируемых в устройстве регистрации при пересечении алмазом рентгено-оптической зоны сепаратора, при-

ведены на рис. 4, при пересечении зоны цирконом — на рис. 5. Оба кристалла при пересечении рентгено-оптической зоны облучили двумя импульсами рентгеновского излучения (после облучения вторым импульсом кристаллы выходили из зоны обзора фотоприемника). Через 2 мс после окончания импульса в течение строба наблюдения вычисляется сигнал отношения компонент: $\ln(I_{EK}/I_{MK}) = \ln(I_{EK}) - \ln(I_{MK})$. При наблюдении кинетики люминесценции алмаза выполняется условие $\ln(I_{EK}) - \ln(I_{MK}) < \ln K$, в результате чего поступает команда на его отсечку в концентрат (рис. 4). При наблюдении циркона это условие не выполняется, поскольку $\ln(I_{EK}) - \ln(I_{MK}) > \ln K$, команда на отсечку не формируется (рис. 5).

Заключение

Итогом проведенных исследований стала разработка и внедрение в производство нового способа регистрации, позволившего без увеличения методических потерь по извлечению алмазов значительно повысить содержание полезного компонента в концентратах многостадийной схемы доводки материала класса $-5,0 + 2,0$ мм. Способ сепарации люминесцирующих минералов по соотношению компонент люминесценции обеспечивает увеличение кондиции концентрата в 2—3 раза. Показатель количества отсечек на один алмаз снижается в 3—4 раза и достигает значения 1,02 отсечки на алмаз. Содержание цирконов в концентрате снижается в среднем до 5 %, в то время как при амплитудно-кинетическом способе регистрации в концентрат извлекалось около 60 % исходных цирконов.

Новый способ сепарации алмазосодержащих руд и устройства для его реализации защищены тремя патентами на изобретения.

С большой долей уверенности можно предположить, что селективность указанного способа окажется не менее эффективной кроме циркона и по отношению к другим сопутствующим алмазу «проблемным» с точки зрения селекции люминесцирующим минералам. Это подтверждают проведенные на УОК-1 экспериментальные исследования отдельных образцов минералов из алмазоносных месторождений Якутии. К примеру, способ соотношения компонент обеспечивает контрастное разделение алмазов от циркона и кальцита (трубка Удачная), галита (трубка Интернациональная). Однако окончательные выводы относительно прочих сопутствующих алмазу минералов можно сделать после набора представительных объемов статистических данных по этим исследованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.М., Носыко С.Ф., Судаков В.М. и др. Отчет о результатах детальной разведки кимберлитовой трубки Каток за 1995—2001 гг. Ангола: Фонды ГРО «Катока», 2001.
2. Мартынович Е.Ф., Морозникова Л.В., Парфианович И.А. Спектральные и кинетические характеристики центров рентгенолюминесценции в алмазе // ФТТ. 1973. Т. 15. V. 4.
3. Соболев Е.В., Дубов Ю.А. О природе рентгенолюминесценции алмазов // ФТТ. 1975. Т. 17. № 4.
4. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.

Горнорудное общество «Катока»,
Республика Ангола
Рецензенты — О.В. Кононов, В.П. Небера