

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ АЛМАЗОВ

**В. А. Чантурия¹, Г. П. Двойченкова^{1,5}, В. В. Морозов²,
В. Н. Яковлев³, О. Е. Ковальчук⁴, Ю. А. Подкаменный^{1,4}**

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,*

E-mail: dvoigr@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²*Национальный исследовательский технический университет “Московский институт стали и сплавов”,
Ленинский проспект, 4, 117049, г. Москва, Россия*

³*Институт “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА”,*

ул. Ленина, 6, 678174, г. Мирный, Россия

⁴*Научно-исследовательское геологическое предприятие АК “АЛРОСА”,
Чернышевское шоссе, 16, 678174, г. Мирный, Россия*

⁵*Политехнический институт (филиал)*

*Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова,
ул. Тихонова, 5/1, 678174, г. Мирный, Россия*

Разработана методика модифицирования поверхности алмаза люминофорсодержащими органическими композициями. В качестве компонентов композиции применены органический люминофор антрацен сцинтилляционный, неорганический люминофор К-35 и гексадекан. Синтезированы индикаторные составы на основе выбранных люминофоров и органических жидкостей и исследованы с использованием опытного сепаратора ПОЛЮС-М. Определены спектрально-кинетические характеристики люминофорсодержащих органоминеральных композиций, обработанных ими слабосветящихся алмазных кристаллов и кимберлитовых минералов. Выбраны составы этих композиций, обеспечивающие улучшение спектрально-кинетических характеристик алмазов и их более полное извлечение в процессе рентгенолюминесцентной сепарации.

Алмазы, органический люминофор, неорганический люминофор, органоминеральные композиции, рентгенолюминесценция, спектрально-кинетические характеристики, сепарация

DOI: 10.15372/FTPRPI20190114

Используемая на обогатительных фабриках АК “АЛРОСА” технология рентгенолюминесцентной сепарации (РЛС) алмазосодержащих кимберлитов в основе методики автоматической регистрации алмазного кристалла содержит определение соотношения быстрой и медленной

компонент сигнала люминесценции [1–4]. Значения этого параметра практически обеспечивают окончательное решение об отсечке исследуемого алмазосодержащего материала в сборник концентрата.

Заметная часть кристаллов алмаза характеризуется аномально низкими или высокими природными значениями быстрой и медленной компонент сигнала люминесценции, что приводит к выходу их соотношений за пределы технологически оптимального интервала и, как следствие, обуславливает попадание алмазных кристаллов в хвостовые продукты РЛС [5–7].

Для решения проблемы извлечения алмазов с аномальными параметрами сигнала люминесценции специалистами ИПКОН РАН, МПТИ (ф) СВФУ, “Якутнипроалмаз” и НИГП АК “АЛРОСА” предложен метод повышения эффективности действующих схем рентгенолюминесцентной сепарации, основанный на применении люминесцирующих веществ, способных избирательно закрепляться на поверхности алмазов и корректировать параметры их светимости [8]. Применение люминофоров для корректировки параметров сигнала люминесценции имеет большой потенциал благодаря возможности широкого выбора химических соединений, обладающих свойствами рентгено- или фотолюминесценции [9–13].

Цель экспериментальных исследований — научное и экспериментальное обоснование выбора состава люминофорсодержащей органоминеральной композиции для повышения извлечения алмазов методом РЛС. Основные задачи исследований состояли в изучении влияния органической фазы на молекулы люминофоров и выбор составов люминофорсодержащих органоминеральных композиций, обеспечивающих возможность их закрепления на поверхности алмаза с целью модифицирования компонент сигнала люминесценции до требуемых значений. Особое внимание уделялось изменению спектрально-кинетических характеристик минералов кимберлита вследствие воздействия на их поверхность применяемых люминофорсодержащих композиций.

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С учетом ранее полученных результатов [8], в качестве предметов исследований приняты композиции, содержащие органический люминофор антрацен сцинтилляционный, обладающий максимальными значениями быстрой компоненты, и неорганический люминофор К-35 (ортосиликат цинка, активированный марганцем), имеющий максимальные параметры медленной компоненты. Определенное соотношение указанных компонент обеспечивает устойчивое извлечение алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации кимберлитовых руд. В качестве органической основы для люминофорсодержащих органоминеральных композиций выбран гексадекан (цетан), являющийся распространенным представителем большинства нефтяных масел [14].

Исследования проводились на люминофорсодержащих композициях и на прошедших этими композициями обработку искусственных слабосветящихся алмазах и минералах кимберлитов: пиробах, оливине, эпидоте (рис. 1).

Изучение спектральных и спектрально-кинетических параметров исследуемых объектов выполнено в несколько этапов в лаборатории института “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА” с помощью портативного сепаратора ПОЛЮС-М [15]. Принцип работы сепаратора основан на использовании свойства алмазов люминесцировать при воздействии рентгеновского излучения и различиях интенсивности люминесценции у минералов кимберлита и алмазных кристаллов. В аппарате реализован люминесцентно-абсорбционный режим анализа, с расположением рентгеновской трубки и приемника люминесценции по разные стороны потока материала.

На первом этапе исследований изучены спектрально-кинетические параметры люминофорсодержащих органоминеральных композиций. В экспериментах использованы индикаторы

торы, полученные на основе смеси цетана с люминофорами в разных концентрациях. Индикаторы с органоминеральной композицией цетана с люминофорами загружали в люминесцентный сепаратор Полюс-М, где измеряли спектрально-кинетические параметры сигнала люминесценции.

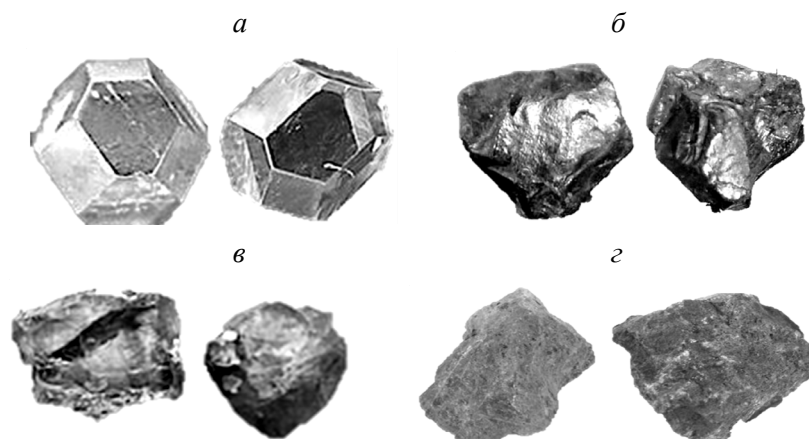


Рис. 1. Внешний вид исследуемых алмазов и минералов кимберлита: *a* — синтетические алмазы, размер — 3 + 2 мм; *б* — минерал-спутник алмаза, пироп, размер — 3 + 2 мм; *в* — главный породообразующий минерал кимберлита, оливин, размер — 2 + 1 мм; *г* — гидрофильный минерал, эпидот, размер — 3 + 2 мм

На втором этапе в органоминеральную композицию цетана с люминофорами (антрацен сцинтилляционный и К-35) добавлялась вода и готовилась рабочая среда. Несветящиеся синтетические алмазы и минералы кимберлита (рис. 1) помещались в рабочую среду с целью закрепления на их поверхностях люминофоров. Далее алмаз или минералы кимберлита с закрепившимся люминофором загружали в люминесцентный сепаратор Полюс-М, где измерялись спектрально-кинетические параметры сигнала люминесценции исследуемых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛЮМИНОФОРОВ В ОРГАНИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВЕ

В первом цикле опытных работ проведены контрольные замеры непосредственно как самой оболочки индикатора, так и с наполнением его органическим растворителем цетаном. Замеры в рентгенолюминесцентном сепараторе Полюс-М не зафиксировали наличия люминесценции у исследуемых контрольных индикаторов. Следующим шагом было изготовление индикаторов на основе люминофоров и цетана, запаянных в пластик. Подготавливался 0.2 % раствор истертого комбинированного люминофора в цетане. На 10 мл цетана добавляли 2 мг комбинированного люминофора (1 мг антрацена и 1 мг К-35, 0.2 мг антрацена и 0.8 мг К-35, 0.1 мг антрацена и 0.9 мг К-35). Органический люминофор антрацен сцинтилляционный (далее антрацен) полностью растворялся в цетане, а неорганический люминофор К-35 оставался в цетане в виде суспензии.

Регистрируемая прибором Полюс-М кинетическая кривая сигнала люминесценции использовалась для расчета спектрально-кинетических параметров люминофорсодержащих органоминеральных композиций (рис. 2). Одним из критериев оценки соответствия исследуемого объекта алмазному кристаллу является отношение компонент, рассчитываемое по формуле:

$$K_k = \frac{(BK + MK)}{MK}, \quad (1)$$

где БК, МК — быстрая и медленная компоненты сигнала на момент окончания импульса возбуждения за вычетом напряжений шума и люминесценции воздуха [5].

Результаты анализа данных по измерениям параметров индикаторов на основе цетана и композиций антрацена сцинтилляционного с К-35 в различном соотношении, представленные в табл. 1, показали, что люминофоры и их смесь обладают высокой способностью к рентгенолюминесценции в масляной среде.

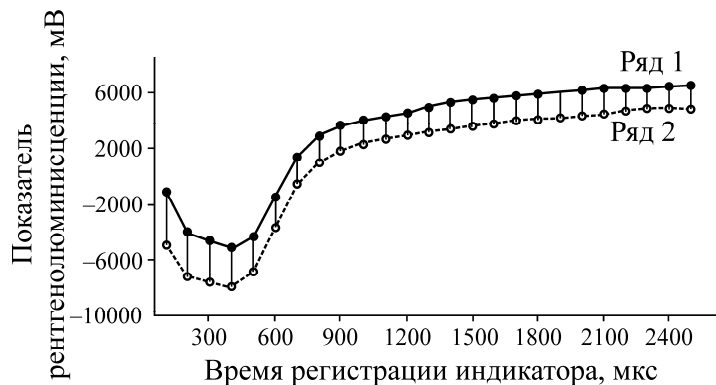


Рис. 2. Регистрация индикатора со смесью цетана и люминофоров: ряд 1, 2 — сигнал от двух последовательных импульсов рентгенолюминесценции алмаза

ТАБЛИЦА 1. Измеренные параметры индикаторов с органоминеральной композицией цетана с люминофорами

Состав	Соотношение К-35 и антрацена	Свертка	Время затухания сигнала, мс	МК	БК	K _с	Индикация
				мВ			
Цетан + люминофоры	9 : 1	0.3	2.0	5954	14300	2.2	+
	9 : 1	0.7	2.8	7656	16980	2.0	+
	4 : 1	0.5	1.8	4630	16453	4.1	+
	4 : 1	0.5	1.8	4454	16366	4.8	+
	1 : 1	0.5	1.8	1235	17243	12.1	—
	1 : 1	0.5	1.8	1405	17391	11.8	+

Сопоставление спектрально-кинетических параметров исследуемых смесей цетана и люминофоров по двум импульсам показало соответствие сигналов значениям, необходимым для регистрации имитаторов в качестве алмазов для установленных параметров РЛС [5]. Так, параметр “свертка” находится в пределах границ селективности 0.3–0.7, отношение компонент — в параметрах селективности 2.2–12.8, время затухания сигнала — в пределах селективности 1.8–2.8 мс. Медленная компонента имеет предел чувствительности 1235–7656 мВ, быстрая компонента — 14300–17391 мВ.

Установлено, что в исследованных диапазонах соотношений концентраций выбранных люминофоров в органическом растворителе цетане полученные композиции обладают необходимыми для модифицирования алмазов спектрально-кинетическими характеристиками [5].

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЛМАЗОВ И МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТА ПОСЛЕ АКТИВАЦИИ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДОЙ

Основная задача заключительного этапа исследований состояла в оценке возможности направленного модифицирования люминофорсодержащей органоминеральной композицией спектрально-кинетических характеристик сигнала люминесценции алмазов. Анализ параметров сигнала люминесценции синтетических алмазов, обработанных смесью органического люминофора антрацен и неорганического люминофора К-35 в соотношении 1 : 20, показал, что активированные слабосветящиеся алмазы по своим характеристикам сместились в область извлекаемых при стандартных настройках РЛС (табл. 2).

Необходимо отметить, что для минералов кимберлита наблюдается такая же тенденция, что может обуславливать их извлечение в концентрат РЛС совместно с кристаллами алмазов. С учетом этого факта дальнейшие исследования были направлены на поиск режимов обработки алмазной поверхности люминофорсодержащими смесями, обеспечивающих селективное разделение алмазов и минералов кимберлита.

ТАБЛИЦА 2. Параметры сигнала люминесценции синтетических алмазов и минералов со смесью органического люминофора антрацен и неорганического люминофора К-35

Минерал	Свертка	Время затухания сигнала, мс	МК	БК	Отношение компонент
			мВ		
Алмаз	0.10	1.2–1.8	1592–1598	16870–16961	11.6–11.7
Пироп	0.29–0.34	2.0	297–351	1110–1207	1.6
Оливин	0.32–0.33	2.0–2.6	243–313	1057–1168	1.8
Эпидот	0.12–0.19	1.8–2.0	143–144	974–1002	2.6–2.8

Для решения поставленной задачи проведены эксперименты в условиях варьирования концентраций и соотношений между применяемыми люминофорами в рассматриваемых композициях. На рис. 3, 4 показаны зависимости параметров спектральных характеристик исследуемых объектов от концентраций люминофоров в органических растворителях. В результате анализа полученных зависимостей установлена достаточно сильная связь МК с концентрацией люминофора К-35 и слабая связь с концентрацией антрацена (рис. 3). Напротив, на БК наибольшее влияние оказывает концентрация антрацена.

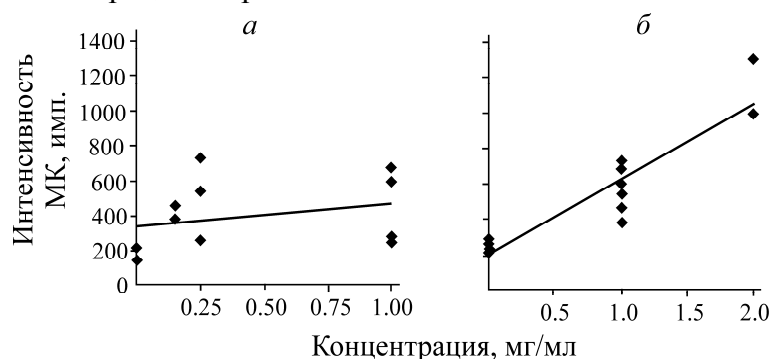


Рис. 3. Зависимость интенсивности люминесценции по МК на алмазе от концентраций в масле: а — антрацена; б — К-35

С учетом поставленной задачи проанализирована зависимость соотношения БК и МК от соотношений расходов люминофоров в смеси их с органическим основанием. Заданные значения отношений компонент (менее 12) достигаются при соотношениях расходов К-35 и антрацена более 30–35 к 1 (рис. 4).

Для оценки влияния люминофора на алмазы различных типов проводился анализ результатов исследований по “очищенным” значениям быстрой и медленной компонент, которые рассчитывались путем вычитания из измеренного значения сигнала на алмазе собственного значения интенсивности по БК и МК. Соотношение “очищенных” (за вычетом собственного излучения алмазов) БК и МК ниже, чем суммарное при тех же соотношениях люминофоров. Для алмазов со смещенной исходной спектральной характеристикой (БК/МК исходного алмаза больше 12) требуется большее соотношение люминофора К-35 и антрацена. Для алмазов с более низким спектральным отношением требуется меньшее соотношение К-35 и антрацена в органической фазе.

Результаты аналогичных исследований, проведенных на минералах кимберлита, показали, что наблюдаются существенные различия влияния люминофоров на конечный сигнал. Так, на сигнал люминесценции образцов минералов (пироп, оливин и эпидот) наибольшее влияние оказывает люминофор К-35.

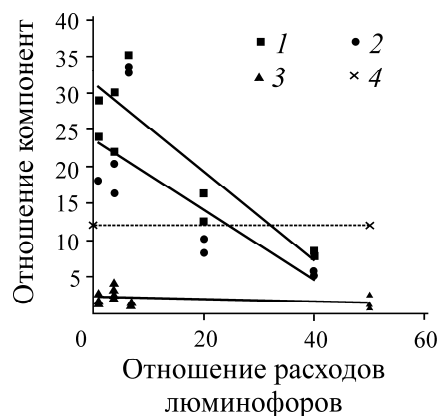


Рис. 4. Зависимость изменения отношения быстрой и медленной компонент сигнала люминесценции от соотношения расходов К35 и антрацена в органической фазе: 1 — для алмаза, измеренная прибором; 2 — для алмаза, рассчитанная с учетом собственной спектральной характеристики алмаза; 3 — для сопутствующих минералов, измеренная прибором; 4 — граничное соотношение для условия извлечения по соотношению БК и МК

Для более точного определения оптимальных параметров люминофорсодержащей среды проведена математическая обработка, которая выполнена с помощью сервиса Matlab стандартным методом регрессионного анализа с использованием двухпараметрических линейных моделей [16]. В результате регрессионного анализа связи сигнала по БК (Y) и концентраций люминофоров в масле (X_1 — К-35; X_2 — антрацен) установлены парные коэффициенты корреляции выходного сигнала отдельных параметров 0.35 и 0.64 и получено уравнение регрессии:

$$Y = 12943.99 + 2735.47X_1 + 2244.41X_2. \quad (2)$$

Коэффициенты частной корреляции уравнения составили 0.690 и 0.807. На основании частных коэффициентов можно сделать вывод об обоснованности включения переменных в регрессионную модель. Средняя ошибка аппроксимации составила 7.02 %, значение критерия Фишера — 12.54 при табличном значении 4.26. Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно.

В результате математической обработки получены двухпараметрические модели зависимостей спектральных характеристик алмаза и сопутствующих минералов от концентраций люминофоров. Достоверность модели множественной линейной регрессии интенсивности сигналов по БК и МК на алмазе и сопутствующих минералах достаточна (табл. 3). Значения коэффициента детерминированности составили 0.62–0.87. Значения критерия Фишера превышают табличные для выборки (12–16 опытов).

Результатами исследований показана возможность достижения рекомендуемых соотношений БК и МК для несветящихся алмазов путем воздействия органического растворителя, содержащего в органической фазе смесь люминофоров К-35 и антрацена. Однако в условиях эксперимента сопутствующие минералы также приобретают соотношения БК и МК, способствующие их извлечению в концентрат.

Повышение расходов рассматриваемых люминофоров увеличивает сигнал по быстрой и медленной компоненте в различной мере. На сигнал БК на алмазе в большей мере влияет антрацен. Люминофор К-35 также весьма существенно увеличивает сигнал по БК. На сигнал по

МК на алмазе в значительно большей мере влияет расход К-35. Добавки антрацена слабо увеличивают сигнал по МК. Соотношение коэффициентов в уравнении регрессии K_1 (при концентрации К-35) и K_2 (при концентрации антрацена) составляет 8.3.

ТАБЛИЦА 3. Статистические параметры связей между интенсивностями сигналов по быстрой и медленной компоненте и концентрацией люминофоров в растворе органического растворителя

Минерал	Компонента	Уравнение	Коэффициенты частной корреляции r_1/r_2	Коэффициент детерминированности R^2	Статистическая значимость по Фишеру
Алмаз	Быстрая	$Y = 12943.9 + 2735.4X_1 + 2244.4X_2$	0.355 / 0.643	0.69	+ (12.50/4.26)
	Медленная	$Y = 176.90 + 50.46X_1 + 432.1X_2$	-0.172 / 0.931	0.87	++ (36.80/4.26)
Оливин	Быстрая	$Y = 37.65 + 226.2X_1 + 710.7X_2$	-0.128 / 0.88	0.81	++ (18.70/4.20)
	Медленная	$Y = -74.60 + 200.9X_1 + 324.3X_2$	0.052 / 0.839	0.83	++ (22.10/4.20)
Пироп	Быстрая	$Y = -35.49 + 279.9X_1 + 642.2X_2$	0.054 / 0.84	0.70	+ (10.40/4.20)
	Медленная	$Y = -41.90 + 112.4X_1 + 174.5X_2$	0.059 / 0.73	0.78	+ (7.80/4.20)
Эпидот	Быстрая	$Y = -17.30 + 194.7X_1 + 625.54X_2$	-0.136 / 0.906	0.85	++ (25.90/4.20)
	Медленная	$Y = -6.07 - 14.96X_1 + 172.47X_2$	0.36 / 0.95	0.90	++ (41.40/4.20)

На сигналы по БК и МК сопутствующих минералов в преобладающей мере влияет расход люминофора К-35. Соотношение коэффициентов K_2/K_1 составляет 1.6 и 3.5. Сравнение значений коэффициентов парной корреляции к отдельным параметрам показывает, что связь интенсивности сигналов БК и МК с концентрацией антрацена мала.

Таким образом, при использовании смеси люминофоров антрацена и К-35 для достижения требуемого соотношения БК и МК:

— позволяющего извлекать алмазы (менее 12), необходимо поддерживать соотношение расходов люминофоров (К-35 и антрацена) более 30–35. Соотношение очищенных от излучения алмазов БК и МК ниже, чем суммарное при тех же соотношениях люминофоров. Для алмазов со смещенной спектральной характеристикой (БК/МК больше 12) требуется большее соотношение люминофора К-35 и антрацена. Для алмазов с низкими спектральными характеристиками — меньшее соотношение К-35 и антрацена;

— не позволяющего извлекать сопутствующие породные минералы (менее 1), необходимо поддерживать концентрацию люминофора К-35 в органической фазе эмульсии более 2–3 мг/мл (0.2–0.3 % или соотношение от 1 : 300 до 1 : 500). При этом можно поддерживать необходимое соотношение между расходами К-35 и антрацена, обеспечивающее кинетические характеристики сигнала люминесценции алмаза, позволяющие извлекать его в процессе РЛС.

Результаты опытов с нулевым расходом люминофора К-35 показывают низкий уровень сигнала по БК и МК, который лежит за порогом чувствительности детектора. Весьма вероятно, что антрацен практически не люминесцирует на исследованных сопутствующих минералах (мощность сигналов по БК и МК ниже чувствительности прибора). Установленная закономерность может быть использована при разделении алмаза и сопутствующих минералов с помо-

щью только люминофора антрацена, при соответствующей настройке сепараторов. Следовательно, люминофор антрацен целесообразно применять в качестве активатора люминесценции алмазов, отличающихся своими природными характеристиками (например, безазотные), которые не извлекаются в условиях стандартных параметров РЛС.

ВЫВОДЫ

Выполнены экспериментальные исследования, позволяющие обосновать и апробировать метод модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов люминофорсодержащими органоминеральными композициями. С использованием данного метода подтверждена эффективность применения композиции органического (антрацена) и неорганического (К-35) люминофоров в цетане, при различных соотношениях компонентов.

С помощью опытного сепаратора ПОЛЮС-М определены спектрально-кинетические характеристики люминесцентного излучения люминофоров и их смесей в различном соотношении на поверхности алмаза и минералов кимберлитов. Результаты исследований показали возможность достижения для синтетических алмазов необходимых соотношений БК и МК люминесцентного сигнала путем обработки смесью люминофоров К-35 и антрацена с цетаном при определенном соотношении компонентов. Подтверждено, что люминофор антрацен целесообразно использовать в качестве самостоятельного активатора люминесценции алмазов, отличающихся своими природными характеристиками и теряемых в условиях стандартных настроек РЛС и их селекции от породных минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миронов В. П.** Оптическая спектроскопия алмазов из концентратов и хвостов рентгенолюминесцентной сепарации // Наука и образование. — 2006. — № 1. — С. 31–36.
2. **Монастырский В. Ф., Макалин И. А., Новиков В. В., Плотникова С. П., Никифорова Т. М.** Повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья // Наука и образование. — 2017. — № 3. — С. 86–90.
3. **Макалин И. А.** Исследование закономерностей распределения характеристик рентгеновской люминесценции алмазосодержащего сырья: дис. ... канд.техн.наук. — Екатеринбург, 2013. — 140 с.
4. **Мартынович Е. Ф., Миронов В. П.** Рентгенолюминесценция алмазов и ее использование в алмазодобывающей промышленности // Изв. вузов. — 2009. — № 12-3. — С. 202–210.
5. **Миронов В. П.** Использование явления люминесценции в алмазодобывающей промышленности. // Наука и техника в Якутии. — 2005. — № 1 (8). — С. 11–14.
6. **Владимиров Е. Н., Казаков Л. В., Колосова Н. П.** Повышение эффективности работы сепаратора алмазов за счет цифровой обработки сигналов // Совр. электроника. — 2008. — № 2. — С. 64–69.
7. **Монастырский В. Ф., Шлюфман Е. М.** Повышение эффективности работы аппаратов РЛС при обогащении алмазосодержащего сырья. IV Конгресс обогатителей стран СНГ / Материалы конгресса, Т. III. — М., 2003. — С. 9–12.
8. **Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Ковальчук О. Е., Подкаменный О. Е., Яковлев В. Н.** Экспериментальное обоснование состава люминофоров для индикации алмазов в условиях рентгенолюминесцентной сепарации кимберлитовых руд // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 112–120.
9. **Menshikova A. Yu., Pankova G. A., Evseeva T. G., Shabsels B. M., and Shevchenko N. N.** Lumino-phore-containing polymer particles: Synthesis and optical properties of thin films on their basis, Nanotechnologies in Russia, April 2012, Vol. 7, Issue 3–4. — P. 188–195.

10. **Комлев И. В.** Синтез и исследование органических люминофоров и других функциональных соединений для современных световых технологий: дис. ... д-ра хим. наук. — М., 2016.
11. **Demchenko A. P.** Introduction to fluorescence sensing, NY, Springer, 2008. — 586 p.
12. **Pron A., Gawrys P., Zagorska M., and D. Djurado** Electroactive materials for organic electronics: preparation strategies, structural aspects and characterization techniques, Chem. Soc. Rev., 2010, Vol. 39, No. 7. — P. 2577–2632.
13. **Смирнова Т. Д.** Методы люминесцентного анализа. Методические указания. — Саратов: СГУ им. Н. Г. Чернышевского. — 2012. — 46 с.
14. **Патраков Ю. Ф., Семенова С. А., Клейн М. С., Вахонина Т. Е., Петров А. А.** Углеводороды нефти. — М.: Наука, 1984. — 266 с.
15. <http://bourevestnik.ru/products/portativnye-separatory-dlya-geologorazvedki/polyus-m/>.
16. **Ингстер Ю. И., Михеев А. В., Солнышкин С. Н., Чирина А. В.** Основные алгоритмы численного анализа статистическое моделирование в пакете Matlab. — СПб.: ЛЭТИ, 2009 — 30 с.

Поступила в редакцию 15/VI 2018

После доработки 15/VI 2018

Принята к публикации 29/I 2019