На правах рукописи

Ковальчук Олег Евгеньевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КИМБЕРЛИТОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗОВ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩИМИ КОМПОЗИЦИЯМИ

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) и Научно-исследовательском геологическом предприятии Акционерной Компании «АЛРОСА» (НИГП АК «АЛРОСА»)

Научный руководитель:
Двойченкова Галина Петровна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории «Теория разделения минеральных компонентов» отдела «Проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья» Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН).

Официальные оппоненты:
Горячев Борис Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обогащение и переработка полезных ископаемых и техногенного сырья» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ «МИСиС»).
Матвеев Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией обогащения полезных ископаемых Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН (ИГДС СО РАН).
Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»).

Защита состоится «22» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте www.ипконран.рф.

Автореферат разослан «___» октября 2020 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор технических наук Матвеева Т.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Развитие основных процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитовых руд направлено на достижение максимально полного извлечения алмазов. Наибольший эффект может быть достигнут за счет повышения эффективности извлечения алмазов крупностью более 2 мм, стоимость которых составляет около 75% от стоимости товарной продукции. Потери алмазов рассматриваемой крупности достигают 5-6%, что в стоимостном выражении превышает 21 млн. долл. в год.

Для извлечения алмазов указанной крупности в технологии обогащения и доводки алмазосодержащих кимберлитов применяется рентгенолюминесцентная сепарация, использующая природную люминесценцию алмазов. Основной причиной снижения технологических показателей рентгенолюминесцентной сепарации являются потери кристаллов со слабой или аномальной люминесценцией, обусловленной, соответственно, пониженной концентрацией дефектов в природных алмазах или повышенной концентрацией примесей, поглощающих вторичное излучение. Такие алмазы в значительных количествах содержатся в кимберлитовых трубках Западной Якутии, разрабатываемых горными предприятиями АК «АЛРОСА». С учетом вышеизложенного задача извлечения алмазов с слабой или аномальной светимостью в технологических схемах обогатительных фабрик является весьма актуальной.

Для решения задачи снижения потерь алмазов в операции рентгенолюминесцентной сепарации целесообразно применение направленного модифицирования их спектральных характеристик с использованием специальных реагентов - люминофоров. Перспективность данного способа корректировки спектрально-кинетических характеристик алмазов обусловлена обширной номенклатурой этих веществ и возможностью достижения практически любых параметров люминесценции, в т. ч. соответствующих спектрально-кинетическим характеристикам природных кристаллов, эффективно извлекаемых при стандартных настройках применяемых сепараторов. Методической основой решения поставленной задачи являются новейшие разработки научной школы ИПКОН РАН под руководством академика В.А. Чантурия, использующие для направленного регулирования свойств алмазов различные типы физических и физико-химических воздействий, обеспечивающих направленное модифицирование свойств алмазных кристаллов и повышение их извлечения в процессах рентгенолюминесцентной сепарации кимберлитовых руд.

Целью работы является повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащих кимберлитов на основе модифицирования спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазов.

Идея работы: придание слабо или аномально светящимся алмазам необходимых для их извлечения параметров рентгенолюминесценции за счет закрепления на поверхности кристаллов люминофорсодержащих композиций.

Задачи исследований:

- изучение причин потерь алмазов в операции РЛС алмазосодержащих кимберлитов;
- обоснование выбранного подхода к решению задачи повышения эффективности РЛС;
- обоснование механизма модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов люминофорами, установление закономерностей процесса и обоснование состава люминофорсодержащих композиций;
- выбор параметров процесса обработки люминофорсодержащими эмульсиями алмазосодержащего материала перед процессом РЛС, обеспечивающих селективность процесса модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов и полноценное извлечение слабо или аномально люминесцирующих кристаллов;
- разработка режима подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу рентгенолюминесцентной сепарации с применением способа модифицирования параметров рентгенолюминесценции алмазов люминофорсодержащими эмульсиями.

Методы исследований: рентгенолюминесцентная и ультрафиолетовая спектрофотомерия алмазов, люминофоров и люминофорсодержащих композиций в видимом диапазоне; электронно-микроскопические исследования кристаллов алмазов; УФ-микроскопия; анализ устойчивости дисперсных систем; измерение спектрально-кинетических характеристик алмазов и минералов кимберлита; лабораторные, опытно-лабораторные и опытно - промышленные технологические испытания процессов подготовки алмазосодержащего сырья к рентгенолюминесцентной сепарации; математическое планирование и обработка результатов экспериментов.

Объектами исследований в настоящей работе являются процессы:

- приготовления люминофорсодержащих эмульсий;
- закрепления люминофорсодержащих композиций на поверхности алмазов;
- направленного модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов люминофорами;
- селективного извлечения алмазов с модифицированными спектрально-кинетическими характеристиками методом рентгенолюминесцентной сепарации.

Предметами исследований в настоящей работе приняты:

- алмазы и минералы гравитационного концентрата схемы переработки алмазосодержащих кимберлитов;
- люминофоры, люминофорсодержащие композиции и водоорганические эмульсии;
- спектрально-кинетические характеристики алмазов и минералов кимберлита.

Положения, выносимые на защиту:

1. Причины потерь алмазов с аномальной или слабой рентгенолюминесценцией заключаются в схожести используемых в качестве разделительных признаков спектрально-кинетических характеристик (амплитуда медленной компоненты, время запаздывания и свертка сигнала рентгенолюминесценции, соотношение быстрой и медленной компонент) с соответствующими характеристиками минералов кимберлита.

2. Композиции для направленного модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов, состоящие из неорганического люминофора с большой медленной компонентой, органического люминофора с большой быстрой компонентой и гидрофобной органической фазы, обеспечивают закрепление люминофоров и придание слабо и аномально люминесцирующим алмазам необходимых для их извлечения спектральных характеристик

3. Механизм закрепления люминофорсодержащих водоорганических эмульсий на алмазах, включает стадии: - диспергирования люминофорсодержащей композиции в воде; - образования конгломератов капель органического компонента и частицы люминофоров; - селективного закрепления капель органического компонента и частиц люминофоров на поверхности алмазных кристаллов.

4. Способ повышения извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов, включающий приготовление водоорганической эмульсии, содержащей растворенные и диспергированные в органической фазе люминофоры (антрацен и гидрофобизированный марганецсодержащий силикат цинка), обработку алмазосодержащих продуктов с последующей отмывкой, регенерацию и возврат эмульсии в процесс, обеспечивает направленное модифицирование спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов до значений, требуемых для их идентификации в процессе рентгенолюминесцентной сепарации.

Научная новизна работы.

1. Разработан новый научный подход к решению задачи повышения извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов, заключающийся в нанесении на их поверхность смеси люминофоров, обеспечивающей соответствие получаемых спектрально-кинетических характеристик алмазов характеристикам природных кристаллов, эффективно извлекаемых при стандартных настройках применяемых сепараторов.

2. Разработан механизм и определены закономерности закрепления люминофорсодержащей композиции на алмазах в условиях варьирования компонентного состава органической и водной фазы люминофорсодержащей эмульсии, обеспечивающего избирательное модифицирование спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов и последующее их селективное извлечение из алмазосодержащих продуктов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются удовлетворительной сходимостью результатов измерений, воспроизводимостью зависимостей выходных параметров при варьировании условий экспериментов, достижением максимальной эффективности процесса рентгенолюминесцентной сепарации в экспериментально обоснованных интервалах варьирования компонентного состава люминофорсодержащей эмульсии, а также положительными результатами технологических испытаний.

Научное значение работы заключается в разработке способа направленного модифицирования спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазных кристаллов за счет закрепления на их поверхности

люминофорсодержащих композиций, обеспечивающего максимально полное извлечение алмазов в процессах рентгенолюминесцентной сепарации.

Практическое значение работы заключается в разработке технологического режима подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу рентгенолюминесцентной сепарации с применением обработки люминофорсодержащими эмульсиями, обеспечивающего повышение извлечения алмазов в концентраты.

Реализация результатов работы: разработанный технологический режим подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу рентгенолюминесцентной сепарации с применением обработки люминофорсодержащими эмульсиями прошел полупромышленные испытания и рекомендован к промышленному освоению на обогатительной фабрике №14 Айхальского ГОКа АК «АЛРОСА».

Личный вклад автора состоит в обобщении и анализе научных информационных источников по теме диссертации, проведении лабораторных исследований свойств и влияния люминофоров на рентгенолюминесценцию алмазов и разработке режима применения люминофорсодержащей эмульсии для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов, разработке методик, выполнении экспериментальных исследований и апробации технологических режимов подготовки алмазосодержащего материала к рентгенолюминесцентной сепарации, обработке и анализе результатов исследований, формулировании выводов и заключения работы.

Апробация работы: основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных совещаниях «Плаксинские чтения» (2014 - 2020); научных симпозиумах «Неделя горняка» (2017 - 2018); Международной конференции «Наука и инновационные разработки – Северу» (2019); 29 Международном конгрессе по обогащению полезных ископаемых (2018). 22 международной конференции «Защита окружающей среды и обогащение полезных ископаемых», Острава, Чехия (2018), научных семинарах ИПКОН РАН (2017 - 2020).

Публикации: Основные положения диссертации опубликованы в 14 работах, из них 5 статей – в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 3 – в изданиях наукометрических баз WoS и Scopus.

Объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 130 наименований, содержит 49 рисунков и 42 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены принципиальные схемы обогащения алмазосодержащих кимберлитов с применением рентгенолюминесцентной сепарации (РЛС), охарактеризованы основные параметры и особенности рентгенолюминесценции алмазов и минералов кимберлита. Обобщены и проанализированы современные методы повышения эффективности процесса РЛС алмазосодержащего материала. Представлены результаты анализа информации о

свойствах и применении люминофоров для индикации и разделения веществ в технологических процессах. Проведен анализ объекта исследований и обосновано направление решения поставленной задачи.

Во второй главе приведены методы измерения состава и спектрально-кинетических характеристик алмазов, минералов кимберлита и люминофорсодержащих композиций. Описаны методики исследования физико-химических свойств и дисперсного состояния люминофорсодержащих водо-органических эмульсий применительно к исследуемым системам и задачам. Приведены описания используемых в работе методик технологических исследований обогатимости алмазосодержащих кимберлитов с использования процесса РЛС.

В третьей главе охарактеризованы причины потерь алмазов и обоснован выбранный способ повышения эффективности процесса РЛС. Представлены результаты анализа связей спектрально-кинетических характеристик алмазов с результатами их обнаружения и обоснованы параметры сигнала рентгенолюминесценции, подлежащие корректировке. Разработан новый подход к модифицированию спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазов, обеспечивающему повышение их извлечения в процессе РЛС алмазосодержащего сырья.

В ***четвертой главе*** описаны результаты исследования люминофоров и люминофорсодержащих композиций, представлен механизм и закономерности закрепления люминофорсодержащих композиций на поверхности алмазов. Обоснован выбор компонентного состава люминофорсодержащих эмульсий и режимов обработки алмазосодержащих гравитационных концентратов с целью селективного модифицирования спектрально-кинетических характеристик аномально и слабо люминесцирующих алмазов.

В ***пятой главе*** представлены результаты технологических исследований, уточняющие состав люминофорсодержащих эмульсий и определяющие режимы обработки алмазосодержащего сырья, обеспечивающие селективное закрепление люминофоров на поверхности алмазных кристаллов. Представлены результаты опытно-промышленной апробации разработанной технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу РЛС.

1. Анализ причин потерь алмазов и выбор способа повышения эффективности процесса РЛС

Для определения причин не извлечения алмазов и снижения селективности процесса РЛС проведены исследования спектральных характеристик алмазов и сопутствующих минералов с построением графиков распределения по интервалу варьирования используемых в качестве разделительного признака характеристик люминесценции. Алмазы и минералы отбирались из класса крупности -5+2 мм гравитационного концентрата схемы обогащения кимберлитов трубки «Интернациональная». Измерение характеристик рентгенолюминесценции алмазов и минералов проводилось по следующим параметрам:

– амплитуде медленной и быстрой компонент сигнала рентгенолюминесценции ($A_{МК}$, $A_{БК}$);

– постоянной времени затухания сигнала рентгенолюминесценции ($\tau_з$);

– значению нормированной корреляционной функции сигнала рентгенолюминесценции (Sv);

– отношению амплитуд быстрой и медленной компонент сигнала рентгенолюминесценции (K_A), рассчитываемому с учетом значения амплитуды сигнала люминесценции воздуха $A_В$ по уравнению:

$$K_A = (A_{БК} + A_{МК} - A_В)/A_{МК}. \quad (1)$$

Результаты исследований показали, что цирконы характеризуются близкими к природным алмазам значениями K_A, Sv и $\tau_З$ и частично могут извлекаться в концентрат РЛС. Для кварца значения Sv и отношения компонент K_A близки к характерным для природных алмазов, т.е. часть зерен минерала соответствуют по параметрам люминесценции селективным параметрам настроек сепаратора и попадают в концентрат. Оливины обладают широким разбросом значений Sv, небольшими значениями $A_{МК}$ и также могут извлекаться в концентрат. Флогопиты характеризуются меньшими, чем у природных алмазов, значениям Sv, $A_{МК}$, однако, их различие недостаточно, и часть флогопита может извлекаться в концентрат.

Анализ зависимостей распределения выхода минералов в исходном питании РЛС от величины разделительного признака (на примере $A_{МК}$) показал, что для основной стадии РЛС характеристики распределения алмазов и минералов кимберлита существенно отличаются, чем обеспечивается эффективность сепарации (рисунок 1а).

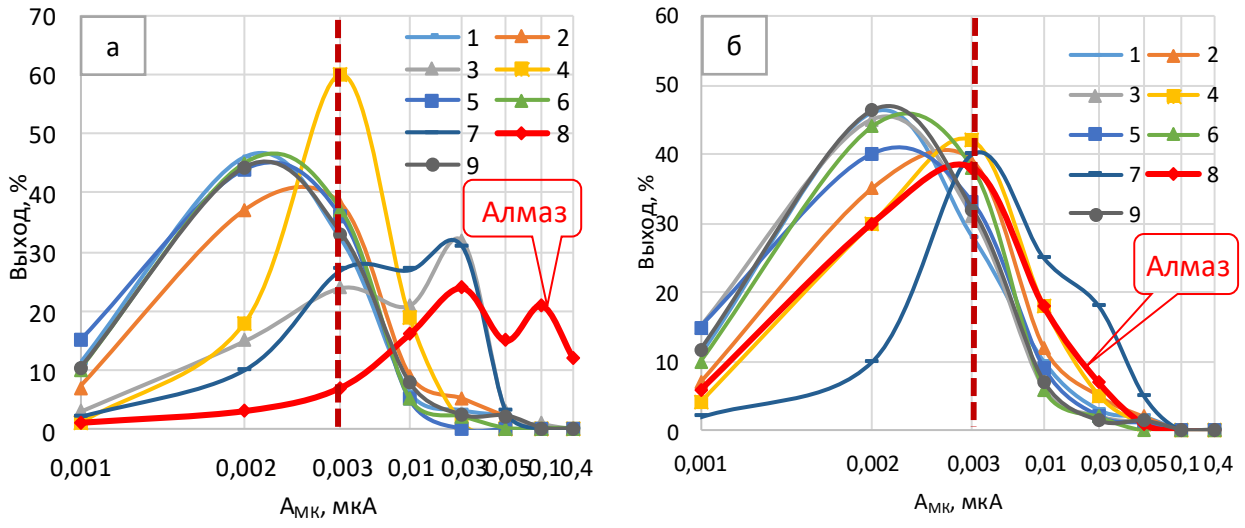

Рисунок 1 – Зависимости распределения выхода минералов в исходном питании основной (а) и контрольной (б) стадиях РЛС от величины разделительного признака - амплитуды сигнала рентгенолюминесценции по медленной компоненте, где: 1 - оливин; 2 – доломит; 3 – циркон; 4 – кварц; 5 - полевые шпаты; 6 – хромит; 7 – флогопит; 8 – алмазы; 9 - общая проба; - - - граница области обнаружения

Анализ распределения алмазов и минералов кимберлита в интервалах значений разделительных признаков показывает, что в контрольной операции РЛС практически невозможно достичь их эффективного разделения, поскольку спектрально-кинетические характеристики не извлеченных в основной РЛС алмазов и минералов кимберлита весьма близки (рисунок 1б). Это обусловлено практически полным извлечением из исходного питания основной операции РЛС алмазов с «правильными» (соответствующими настройкам сепаратора) спектрально-кинетическими характеристиками и не извлечением слабо и аномально люминесцирующих алмазов с небольшими значениями $A_{МК}$ (менее 0,003 мкА) и высокими (более 12) значениями K_A.

Полученные результаты объясняют низкую эффективность операции контрольной РЛС и ставят задачу модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов до значений, обеспечивающих их извлечение при стандартных настройках сепараторов.

Учитывая невозможность изменения в нужном направлении одновременно всех спектрально-кинетических характеристик алмазов были выбраны наиболее «важные» из них. Результаты корреляционного анализа связей выходной функции – обнаружения кристаллов алмазов и зерен минералов кимберлита и значений отдельных спектрально-кинетических характеристик зерен минералов и кристаллов алмазов при срабатывании сепаратора в режимах «обнаружено» (γ+) - «не обнаружено» (γ-), представленные в таблице 1, показали, что наиболее часто в качестве эффективных параметров при разделении срабатывают характеристики Sv, $A_{МК}$, Sv и K_A. Наименьшая частота использования и корреляция к результирующей функции γ+ характерна для $A_{БК}$.

Таблица 1 - Матрица парных коэффициентов корреляции R извлечения минералов в концентрат и параметров люминесценции

-	γ+	Sv	$\tau_З$	$A_{МК}$	$A_{БК}$	K_A
γ+	1	0.131	-0.247	0.132	-0.111	-0.181
Sv	0.131	1	0.057	0.493	-0.375	-0.646
$\tau_З$	-0.246	0.0576	1	-0.190	-0.236	-0.192
$A_{МК}$	0.132	0.493	-0.190	1	0.404	-0.118
$A_{БК}$	-0.111	-0.375	-0.236	0.404	1	0.718
K_A	-0.181	-0.646	-0.192	-0.118	0.718	1

Стандартизированная форма уравнения регрессии зависимости результирующей функции от спектрально-кинетических характеристик имеет вид:

$$Y = 0.285X_1 - 0.305X_2 - 0.1424X_3 - 0.0491X_4 - 0.191X_5, \quad (2)$$

где Y ; X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 - стандартизованные значения результирующей функции γ+ и факторов Sv, $\tau_З$, $A_{МК}$, $A_{БК}$, K_A

По величинам коэффициентов при факторах X_1-X_5 в уравнении 2, наиболее значимыми являются факторы X_1 (Sv), X_2 ($\tau_З$), X_3 ($A_{МК}$), X_5 (K_A). Эти рентгеноспектральные характеристики были приняты в дальнейшем как параметры, подлежащие оптимизации (модифицированию).

2. Выбор и обоснование состава люминофорсодержащих композиций для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов

Выбранный подход к модифицированию спектрально-кинетических характеристик аномально и слабо люминесцирующих алмазов заключается в нанесении на их поверхность смеси люминофоров, обеспечивающих соответствие измененных спектрально-кинетических характеристик алмазов характеристикам природным кристаллов, эффективно извлекаемых при стандартных настройках применяемых сепараторов.

Реализация выбранного подхода к изменению спектрально-кинетических характеристик алмазов за счет обработки люминофорсодержащими композициями поясняется рисунком 2. Для достижения требуемого результата предполагается одновременное увеличение амплитуд медленной и быстрой компонент ($А_{МК}$ и $А_{БК}$) в определенном соотношении, когда аномально люминесцирующие алмазы с высокой $А_{БК}$ или слабо люминесцирующие со сниженной $А_{МК}$ смещаются в область их обнаружения (идентификации в качестве алмазов) по параметрам: $А_{МК}$ и соотношению амплитуд компонент ($К_А$).

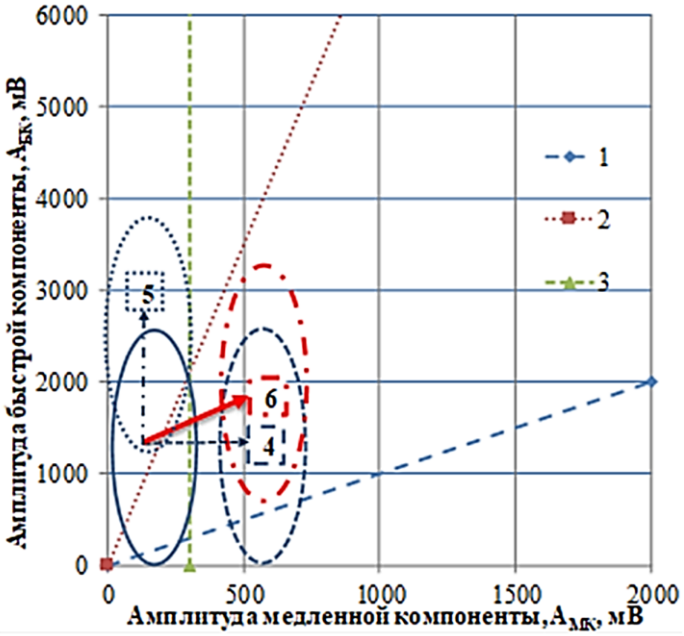

Рисунок 2 - Диаграмма изменения спектрально-кинетических характеристик алмаза, где: 1,2 – нижняя и верхняя границы области идентификации по $К_А$; 3 - граница области идентификации по величине $А_{МК}$; 4,5,6 – векторы смещения спектральных характеристик, где: 4 – при увеличении $А_{МК}$; 5 - при увеличении $А_{БК}$; 6 - при одновременном увеличении $А_{МК}$ и $А_{БК}$

Наилучшие результаты достигаются при одновременном увеличении $А_{МК}$ и $А_{БК}$, когда область характерных значений спектрально-кинетических характеристик смещается под углом относительно оси абсцисс (рисунок 2, вектор 6). При этом аномально люминесцирующие алмазы с высокой $А_{БК}$ или слабо люминесцирующие с низкой $А_{МК}$ переходят в область их идентификации в качестве алмазов по этим

критериям. Выбор направления изменения параметров Sv и τ_3 аналогичным образом предполагает одновременное увеличение обеих характеристик, когда аномально и слабо люминесцирующие алмазы с малыми значениями Sv и τ_3 переходят в область их обнаружения по соответствующим критериям.

Первоначальный выбор люминофоров проводился исходя из возможности получения сигнала рентгенолюминесценции, сходного с сигналом природного алмаза. Были выбраны органические люминофоры толан (дифенилацетилен, $C_6H_5–C≡C–C_6H_5$) и антрацен ($C_{14}H_{10}$) сцинтилляционный и каменноугольный, неорганические люминофоры ФЛ-530 ($ZnSiO_4$:Mn) и Э-515 (ZnS:Cu:Al). Для образцов люминофоров массой 0,5 мг на основе эпоксидного клея были измерены параметры рентгенолюминесценции. Затем был проведен подбор композиций люминофоров, наиболее точно повторяющих по спектрально-кинетическим параметрам характеристики рентгенолюминесценции природных алмазов.

Анализ результатов экспериментов показал, что исследованные люминофоры имеют параметры люминесценции, близкие к отдельным характеристикам природных алмазов, а спектрально-кинетические характеристики смеси антрацена сцинтилляционного и люминофора ФЛ-530 наиболее приближены к принятым в качестве «важных» соответствующим характеристикам природных алмазов (таблица 2).

Таблица 2 – Спектрально-кинетические характеристики алмазов и люминофорсодержащих индикаторов на основе эпоксидной смолы и результаты их идентификации в сепараторе «Полюс-М»

Природные алмазы, индикаторы	Sv	τ_3, мс	$A_{МК}$, мВ	$A_{БК}$, мВ	K_A	Результат диагностики
Алмазы, извлеченные из концентрата РЛС	0,1-1,0	0,1-15	600-12000	2500-18000	0,5-12	обнаружен
Алмазы, извлеченные из хвостов РЛС	0-0,4	0-1,0	0-1400	2500-24000	4-50	не обнаружен
Толан	0,02-0,04	1,2-5,6	129-165	2341-2574	12-13,6	не обнаружен
Антрацен. каменоуг.	0	1,2	95-118	4947-5031	37,6-46	не обнаружен
Антрацен сцинтиляц.	0	1,2-1,4	156-267	8415-14376	50	не обнаружен
Э-515	0,07-0,1	0,6-0,8	3723-4800	18696-18912	3,8-4,8	не обнаружен
ФЛ-530	0,49-0,51	2,2-2,4	3783-3810	1600-1884	0,3-0,35	не обнаружен
Антрацен сцинтиляц. + ФЛ-530	0,44-0,50	1,5-1,7	2450-2648	6380-6921	3,5-4,5	обнаружен
Наполнитель - смола	0,01-0,02	0,6-3,8	119	610-997	1,8-3,8	не обнаружен

Соответствие спектрально-кинетических характеристик смеси люминофоров Антрацен и ФЛ-530 требуемым значениям подтверждено положительным результатом диагностики в сепараторе «Полюс-М».

Выбранный подход к решению задачи модифицирования спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазов с помощью люминофоров реализуется при помощи способа, включающего

приготовление люминофорсодержащей композиции, состоящей из смеси люминофоров и гидрофобной органической фазы (основы композиции), обеспечивающей закрепление люминофоров на поверхности алмазов.

Для определения поведения люминофоров в среде гидрофобной органической фазы была изучена композиция, состоящая из выбранных люминофоров и органического растворителя - гексадекана. Результаты измерений показали, что композиция из антрацена сцинтилляционного с ФЛ-530 в гексадекане сохраняет необходимые спектрально-кинетические характеристики, закрепляется на алмазе и позволяет придать не извлекаемому алмазу параметры люминесценции, близкие к характеристикам природных алмазов, эффективно извлекаемых в РЛС (таблица 3).

Таблица 3 – Спектрально-кинетические характеристики композиций люминофоров и алмаза до и после обработки в люминофорсодержащей композиции с результатами диагностики в сепараторе «Полюс-М»

Состав образца:	Sv	$\tau_з$, мс	$А_{МК}$, мВ	$А_{БК}$, мВ	$К_А$	Результат диагностики
Люминофоры антрацен и ФЛ-530 при соотн. от 1:1 до 1:40 в гексадекане	0,3-0,7	2-2,8	5954-7657	14300-16980	2,0 – 2,2	обнаружен
Алмаз синтетический без обработки	0	0,2	140-345	7000-8000	более 50	не обнаружен
Алмаз синтетический после обработки композицией люминофоров в гексадекане	0,3-0,5	1,8	1125-1405	17241-17391	7,5-12	обнаружен
Граничные значения настроек сепаратора	>0,1	>1,0	>300	-	1-12	

Для придания слабо и аномально люминесцирующим алмазам необходимых для их полного извлечения спектрально-кинетических характеристик важен правильный выбор соотношения между амплитудами быстрой и медленной компонент сигнала рентгенолюминесценции ($К_А$), которое регулируется путем изменения соотношения концентраций используемых люминофоров. Результаты экспериментов при различных соотношениях люминофоров показали, что требуемые значения $К_А$ (1 - 12) достигаются при отношении концентраций люминофоров ФЛ-530 и антрацена более 30-40:1 (рисунок 3). При этом для части минералов кимберлита значение характеристики $К_А$ становится меньше граничного, что предотвращает их попадание в алмазный концентрат.

Основными технологическими свойствами люминофорсодержащих композиций являются способность к растворению и удерживанию люминофоров в/на каплях органической основы, а также возможность закрепления капель органической основы люминофорсодержащей композиции на алмазах. В качестве органической основы композиции было предложено использовать дизельное топливо и смеси на его основе. Дизельное топливо характеризуется низкой температурой загустевания (-10°С). Доля нафтеновых и ароматических компонентов составляет 5-8%, что обеспечивает устойчивое закрепление люминофорсодержащей композиции на алмазах.

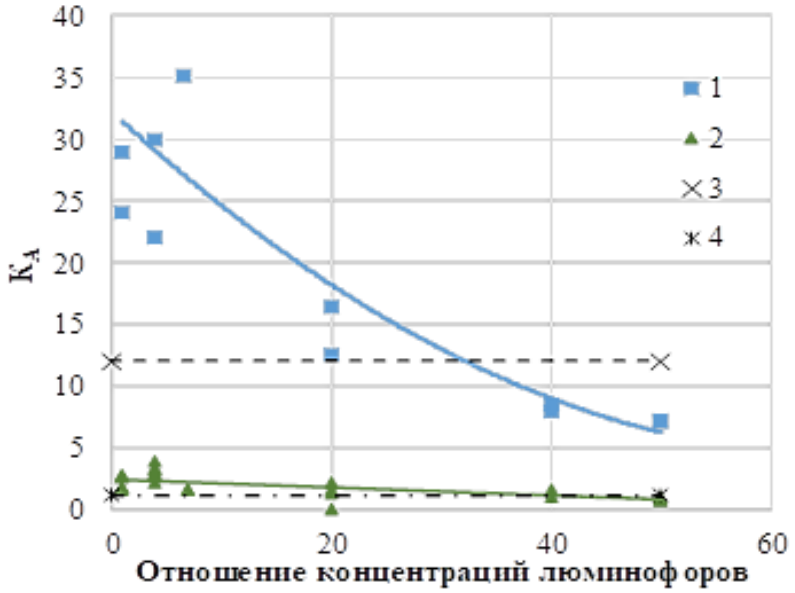

Рисунок 3 - Зависимости отношения быстрой и медленной компонент (K_A) от соотношения концентраций люминофоров ФЛ-530 и антрацена, где: 1 – для алмаза; 2 – для сопутствующих минералов; 3,4 – граничное соотношение для условия извлечения по K_A

3. Исследование механизма закрепления и выбор состава люминофорсодержащих водоорганических эмульсий для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов

Для модифицирования спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазов предложено использовать нанесение на их поверхность люминофоров из водоорганических эмульсий. Схема (механизм) процесса, представленная на рисунке 4, включает основные стадии: диспергирование люминофорсодержащей органической фазы в воде (1), образование конгломератов капель органической фазы и частиц люминофоров (2), селективное закрепление капель органического компонента и частиц люминофоров на поверхности алмазных кристаллов (3).

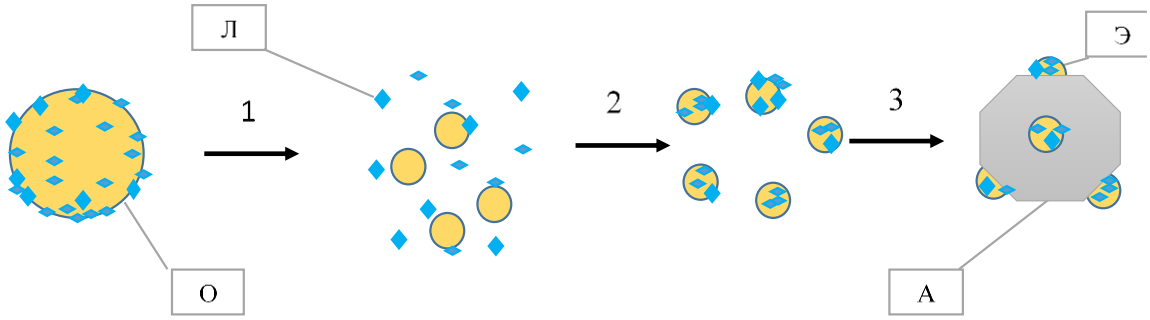

Рисунок 4 - Механизм закрепления люминофорсодержащей композиции на алмазах: 1 – диспергирование органической фазы (О) и люминофоров (Л) в воде; 2 – образование конгломератов капель органической фазы эмульсии и частиц люминофоров; 3 – закрепление капель органической фазы эмульсии (Э) с люминофорами на алмазе (А)

Механизм закрепление люминофоров на поверхности алмазов был установлен методом рентгенолюминесцентной микроскопии, показавшим, что органическая фаза эмульсии закрепляется на поверхности кристаллов алмаза, погруженных в люминофорсодержащую эмульсию, в виде капель, а неорганический люминофор концентрируется на границе раздела органической и водной фаз эмульсии.

Принципиальная схема приготовления люминофорсодержащей эмульсии включает стадии подготовки люминофоров, приготовления люминофорсодержащей композиции, подготовки водной фазы эмульсии и приготовления конечной эмульсии диспергированием (рисунок 5).

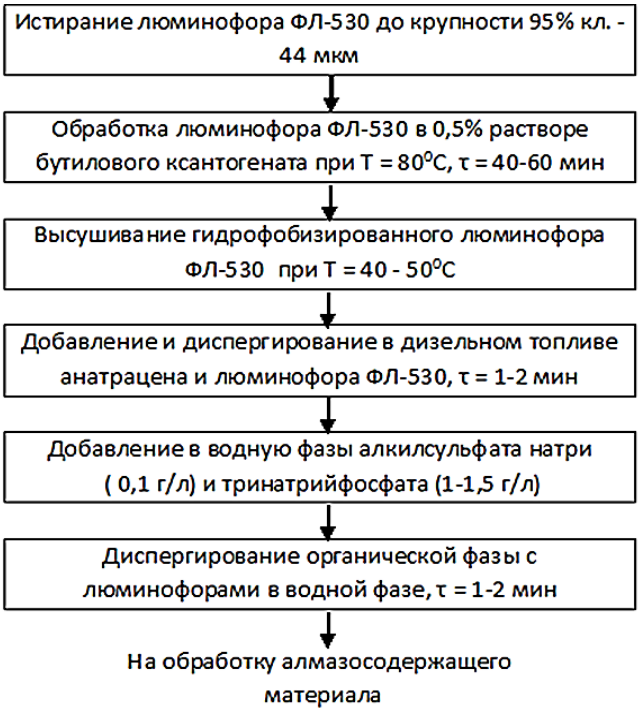

Рисунок 5. Схема приготовления люминофорсодержащих эмульсий

Для транспортирования люминофоров и удерживания на поверхности алмазов необходимо обеспечить их устойчивое нахождение в органической фазе эмульсии. Анализ лиофильности люминофоров осуществлялся по величине их экстракции в слой органической фазы эмульсии. Результатами выполненных экспериментов установлено, что антрацен растворим (до 1,25 г/л) и хорошо смачивается дизельным топливом, что обуславливает его концентрирование в органической фазе эмульсии. Люминофор ФЛ-530 характеризуется большей по сравнению с водой смачиваемостью в органической фазе, однако со временем его лиофильность снижается. Для повышения лиофильности люминофора ФЛ-530 была предложена обработка реагентами-гидрофобизаторами - растворами солей олеиновой и ксантогеновых кислот.

Проверка эффективности гидрофобизации люминофора проводилась путем измерения его извлечения в слой органической фазы эмульсии. Согласно полученным результатам, представленным в таблице 4, гидрофобизированный люминофор ФЛ-530 максимально удерживается в органической фазе эмульсии при измельчении до крупности – 10 мкм на 92,5% и использовании реагента – диспергатора.

Таблица 4 – Распределение исходного и гидрофобизированного люминофора ФЛ-530 в органической (дизельном топливе) и водной фазах эмульсии при доизмельчении и использовании реагентов-диспергаторов

№	Условия опыта	Доля ФЛ-530, удерживаемого в ДТ, мг/%	Доля выпавшего в воду люминофора, мг/%
1	Неизмельченный ФЛ-530 (95% кл. –25 мкм)	72,5	27,5
2	Измельченный ФЛ-530 (95% кл. –10 мкм)	92,5	7,5
3	Измельч. ФЛ-530 гидрофобизированный 0,5% р-ром ксантогената калия	99	1
4	Измельч. ФЛ-530 гидрофобизированный 0,1% р-ром олеата натрия	98,5	1,5
5	Измельч. ФЛ-530 гидрофобизированный 0,1% р-ром олеата натрия с добавкой в водную фазу алкилсульфоната натрия	99	1
6	Измельч. ФЛ-530 гидрофобизированный 0,5% р-ром ксантогената калия с добавкой в воду алкилсульфоната натрия	99,25	0,75

Гидрофобизация измельченного люминофора ФЛ-530 0,5% раствором изопропилового ксантогената или 0,1% раствором олеата натрия приводит к повышению лиофильности люминофора и его концентрированию в органической фазе на 98,5 - 99% (таблица 4, опыты 3-4). Удерживающая способность ДТ по отношению к люминофору ФЛ-530 возрастает при добавках реагента-диспергатора органической фазы - алкилсульфоната натрия (опыты 5,6), что обусловлено уменьшением размеров капель органической фазы и увеличением межфазной поверхности.

Повышение эффективности закрепления люминофорсодержащей композиции на алмазах при использовании обработанного гидрофобизаторами люминофора ФЛ-530 подтверждено результатами визиометрического контроля интенсивности закрепления, полученных с использованием аппарата «Луч-1Ф». Данные, приведенные в таблице 5, показывают, что доля светящихся алмазов при использовании гидрофобизированного люминофора увеличивается на 35-45%.

Таблица 5 - Эффективность закрепления исходного и гидрофобизированного люминофора ФЛ-530 на алмазах

№	Тип люминофора, режим гидрофобизации	Доля алмазов с закрепившимся люминофором, %
1	Исходный люминофор ФЛ-530	45
2	ФЛ-530, гидрофобизированный олеатом натрия	80
3	ФЛ-530, гидрофобизированный изопропиловым ксантогенатом калия	90

Для повышения селективности закрепления люминофорсодержащей композиции на алмазах относительно минералов кимберлита исследовано применение реагентов-регуляторов адгезионной активности органической фазы эмульсии: гексаметафосата натрия (ГМФ) и тринатрийфосфата (ТНФ). Использование ТНФ с

концентрацией 1-1,5 мг/л при обработке минералов кимберлита эмульсией позволяет снизить долю зерен с закрепившимся люминофором до 0-10% (таблица 6).

Таблица 6 - Изменение интенсивности закрепления люминофоров на алмазах и кимберлите после обработки в люминофорсодержащей эмульсии с различной концентрацией тринатрийфосфата

№	Концентрация тринатрийфосфата, г/л	Доля кристаллов алмаза и зерен кимберлита с закрепившимся люминофором, %	
		кристаллы алмазов	зерна кимберлита
1	0	70	30
2	0,5	85	25
3	1	80	10
4	1,5	60	0

4. Разработка способа и технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к рентгенолюминесцентной сепарации с использованием люминофорсодержащих эмульсий

Разработка способа и технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к рентгенолюминесцентной сепарации включала выбор состава и режима приготовления люминофорсодержащей эмульсии, обеспечивающих достижение требуемых спектральных характеристик алмазов, а также условий обработки рудного материала перед РЛС. Изменения характеристик алмазов и минералов кимберлита изучены с использованием метода рентгенолюминесцентного анализа на сепараторе «Полюс-М».

Разработанный способ повышения извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов, включающий приготовление водоорганической эмульсии, содержащей растворенные и диспергированные в органической фазе люминофоры (антрацен и гидрофобизированный марганецсодержащий силикат цинка), обработку алмазосодержащих продуктов с последующей отмывкой, регенерацию и возврат эмульсии в процесс, обеспечивает направленное модифицирование спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов до значений, требуемых для их идентификации в процессе рентгенолюминесцентной сепарации.

Разработанная технология обработки алмазосодержащего материала перед процессом РЛС, апробированная в режиме укрупненных лабораторных исследований на концентрате тяжелосредной сепарации, включает гидрофобизацию доизмельченного люминофора ФЛ-530 олеатом или ксантогената натрия, растворение и диспергирование люминофоров в используемом в качестве основы композиции дизельном топливе, добавление в водную фазу эмульсии алкилсульфоната натрия (0,1 г/л), ГМФ или ТНФ (до 1,5 г/л), диспергирование люминофорсодержащей композиции в водной фазе с получением устойчивой эмульсии. Режим подготовки алмазосодержащего продукта к процессу РЛС при укрупненных лабораторных исследованиях включал его обработку в люминофорсодержащей эмульсии в течение 1 мин, отделение эмульсии и промывку пробы (рисунок 6).

Рисунок 6 - Принципиальная схема проведения эксперимента при укрупненных лабораторных исследованиях

Результаты измерений характеристик алмазов и минералов кимберлита после обработки люминофорсодержащими эмульсиями показали, что преимущественное увеличение количества закрепившейся люминофорсодержащей композиции на алмазных кристаллах обусловливает, соответственно, приращение амплитуды сигналов рентгенолюминесценции на алмазах в 1,8-7 раз выше, чем на минералах кимберлита.

При рекомендуемой концентрации антрацена и ФЛ-530 (1,25 и 50 г/л) увеличение $А_{МК}$ и $А_{БК}$ обеспечивает переход аномально люминесцирующего алмаза (с большой $А_{БК}$) в область положительной идентификации (рисунок 7, линия 4).

Люминесцирующие минералы кимберлита с близкими к данному типу алмазам спектральными характеристиками (магнезиальный ильменит и флогопит) в меньшей степени изменяют свои характеристики и не достигают области, в которой они могут распознаваться как алмазы (рисунок 7, линия 5).

Прошедшие обработку слабо люминесцирующие алмазы увеличивают значения $А_{МК}$ и $А_{БК}$ и распознаются как алмазы (рисунок 7, линия 6). Слаболюминесцирующие минералы кимберлита с близкими к данному типу алмазов спектральными характеристиками (пироп), наращивают значения компонент в значительно меньшей степени и не распознаются как алмазы (линия 7). Минералы кимберлита с заметной медленной компонентой не попадают в область распознавания алмазов (линия 8).

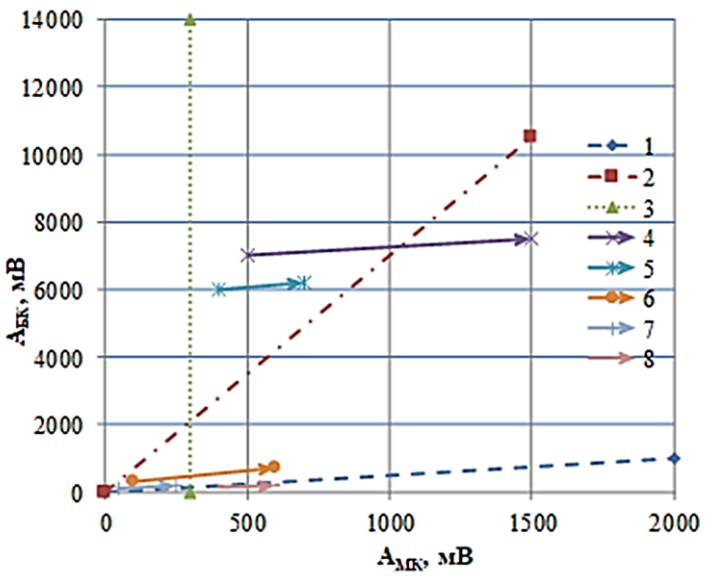

Рисунок 7 - Диаграмма изменения спектральных характеристик алмазов и минералов кимберлита после обработки в люминофорсодержащей эмульсии, где: 1,2 – нижняя и верхняя граница области идентификации по $К_А$; 3 - граница области идентификации по величине $А_{МК}$; 4 – 8 - изменение спектральных характеристик, где: 4 - аномально люминесцирующих алмазов; 5 - люминесцирующих минералов кимберлита; 6 - слаболюминесцирующих алмазов; 7 - слабо люминесцирующих минералов кимберлита; 8 - минералов кимберлита с малой быстрой компонентой.

Аномально люминесцирующие алмазы после обработки также увеличивают значение Sv с 0,36 до 0,41 и $\tau_з$ с 0,63 до 2,1. и достигают значений, необходимых для их положительной идентификации. У большинства минералов кимберлита значения Sv и $\tau_з$ возрастают незначительно и не достигают граничных значений.

В контрольных испытаниях, проводимых на хвостах основной РЛС, наилучшие результаты для аномально светящихся алмазов (с $К_А$ более 12) были получены с использованием эмульсии с концентрацией в композиции ФЛ-530 - 50 г/л, антрацена - 1,25 г/л, ГМФ –1,5 г/л (таблица 7, режим 1).

Таблица 7 - Сводная таблица средних спектрально-кинетических характеристик и результатов обнаружения алмазов и кимберлита до и после их обработки люминофорсодержащей эмульсией

Исследуемые пробы	Sv	$К_А$	$\tau_з$, мс	$А_{МК}$, мВ	$А_{БК}$, мВ	Результат диагностики
Аномально люминесцирующие алмазы, кимберлит -3+1 мм, режим 1						
Алмазы исходные	0,09	14,9	0,4	212	3342	не обнаружен
Кимберлит исходный	0,05	12,8	0,4	139	1745	не обнаружен
Алмазы обработанные	**0,15**	**5,6**	**1,8**	**465**	**3530**	**обнаружен**
Кимберлит обработанный	0,06	12,2	1,4	168	2131	не обнаружен
Слабо люминесцирующие алмазы, кимберлит, -3+1 мм, режим 2						
Алмазы исходные	0,15	16,6	0,6	137	2283	не обнаружен
Кимберлит исходный	0,05	1,8	0,4	131	1729	не обнаружен
Алмазы обработанные	**0,18**	**5,4**	**1,9**	**451**	**2668**	**обнаружен**
Кимберлит обработанный	0,06	2,2	1,1	150	2131	не обнаружен

Для слабо люминесцирующих алмазов наиболее эффективной оказалась эмульсия с концентрацией ФЛ-530 – 37,5 г/л, антрацена – 0,75 мг/л, ТНФ – 1,5 г/л. (таблица 7, режим 2).

На стадии укрупненных лабораторных исследований также был выбран режим отмывки обработанного кимберлитового материала от эмульсии с целью снижения выхода сопутствующих минералов кимберлита в концентрат РЛС. Для дальнейших испытаний была выбрана температура отмывки 35^{0}С и продолжительность промывки 15 с. Результаты данного этапа исследований показали, что выбранные режимы обработки люминофорсодержащими эмульсиями позволяют улучшить спектрально-кинетические характеристики алмазов с аномальной или слабой светимостью и селективно извлечь их из хвостов основной операции РЛС.

5. Опытно-промышленная апробация технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к рентгенолюминесцентной сепарации

Опытно-промышленная апробация технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к рентгенолюминесцентной сепарации была проведена на обогатительной фабрике №3 Мирнинского ГОКа с использованием промышленного сепаратора ЛС-Д-4-03Н. Схема установки для опытно-промышленных испытаний, представленная на рисунке 8, обеспечивала проведение операций приготовления эмульсии, обработки алмазосодержащего продукта, сепарации алмазов и кимберлита, возврата эмульсии для ее повторного использования.

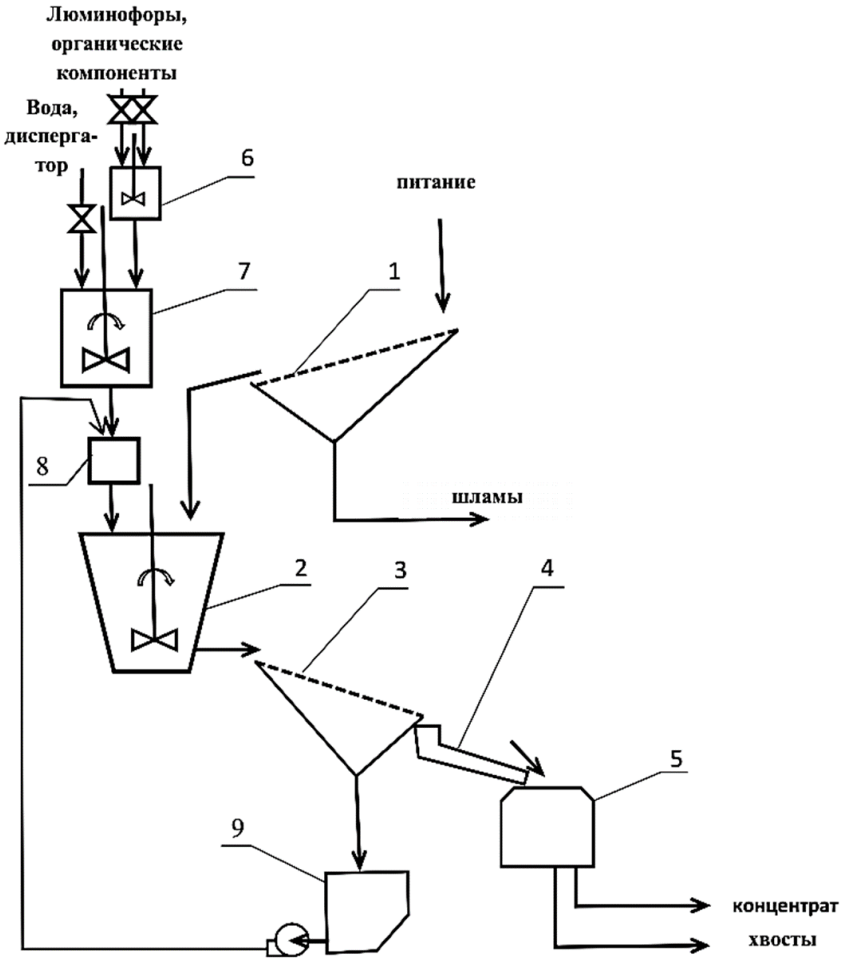

Рисунок 8 - Схема установки для сепарации алмазосодержащего материала, где:
1 - грохот; 2 - емкость для обработки исходного питания люминофорсодержащей эмульсией;
3 - грохот для удаления люминофорсодержащей эмульсии; 4 – дозатор;
5 – рентгенолюминесцентный сепаратор ЛС- Д-4-03Н;
6 - емкость приготовления смеси люминофоров с органической фазой; 7 – емкость для приготовления эмульсии;
8- дозатор; 9 – сборник эмульсии

При проведении опытно-промышленных испытаний использовалась эмульсия с концентрацией в композиции ФЛ-530 - 50 г/л, антрацена - 1,25 г/л, что обусловлено необходимостью извлечения в первую очередь аномально люминесцирующих алмазов. Программа испытаний включала две серии, отличающиеся расходом диспергатора (гексаметафосфата натрия), используемого в составе люминофорсодержащей эмульсии (таблица 8).

Таблица 8 - Результаты опытов РЛС алмазосодержащих проб после обработки люминофорсодержащей эмульсией

Наименование показателей	До обработки	После обработки и отмывки
Серия 1. Расход ГМФ 1 г/л		
Извлечение алмазов, %	95,5	100,0
Выход концентрата, %	1,0	9,7
Серия 2. Расход ГМФ 1,5 г/л		
Извлечение алмазов, %	94,5	100,0
Выход концентрата, %	1,0	1,3

Подсчетом регистраций выделенных в концентрат алмазных кристаллов установлено, что после обработки люминофорсодержащей эмульсией в обеих сериях были извлечены все алмазы выборки, в т.ч. не обнаруженные системой регистрации сепаратора ЛС-Д-4-03Н при диагностике этой же выборки без обработки люминофорсодержащей эмульсией. Прирост извлечения алмазов составил 4,5% в 1 серии и 5,5% во второй серии испытаний (таблица 8). Установлено преимущество применения люминофорсодержащей эмульсии, приготовленной с использованием реагента-диспергатора гексаметафосфата натрия при расходе 1,5 г/л (серия 2) и подтверждена селективность процесса (выход в концентрат РЛС кимберлитовой рудной массы 1,3%, таблица 8):

Анализ изменения спектрально-кинетических характеристик показал, что дополнительное извлечение алмазов произошло преимущественно за счет аномально люминесцирующих кристаллов с большим значением K_A.

Результаты опытно-промышленных испытаний, показавшие технологическую эффективность разработанного режима подготовки хвостов основной стадии РЛС к контрольной операции, позволили рекомендовать разработанную технологию для промышленного освоения на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» с ожидаемым годовым экономическим эффектом 45,7 млн рублей. Промышленные испытания разработанной технологии запланированы на обогатительной фабрике №14 Айхальского ГОКа в 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащих кимберлитов на основе модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов люминофорсодержащими композициями, обеспечивающих снижение потерь слабо и аномально люминесцирующих алмазов.

Автором получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что причины низкой эффективности операции контрольной РЛС заключаются в схожести спектрально-кинетических характеристик (амплитуды медленной компоненты, свертки сигнала рентгенолюминесценции, постоянной времени запаздывания, соотношения быстрой и медленной компонент) алмазов, обладающих аномальной или слабой рентгенолюминесценцией, и соответствующих характеристик минералов кимберлита.
2. Разработан новый научный подход к решению задачи повышения извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов, заключающийся в нанесении на их поверхность люминофорсодержащих композиций (люминофоров с большой медленной и быстрой компонентой и гидрофобной органической фазы), обусловливающих соответствие получаемых спектрально-кинетических характеристик алмазов характеристикам природных кристаллов, эффективно извлекаемых при стандартных настройках применяемых сепараторов.
3. Установлены новые закономерности и разработан механизм закрепления на поверхности алмазов люминофорсодержащих композиций, включающий стадии диспергирования люминофорсодержащей органической фазы в воде, образования конгломератов капель органического компонента и частиц люминофоров, селективного закрепления капель органической фазы с люминофорами на поверхности алмазов, обеспечивающий избирательное модифицирование их спектрально-кинетических характеристик алмазов и последующее селективное извлечение из алмазосодержащих продуктов.
4. Дано экспериментальное обоснование режима гидрофобизации неорганического люминофора и оптимального состава люминофорсодержащих эмульсий (соотношения органического и неорганического люминофоров, концентрации реагентов-регуляторов устойчивости и адгезионной активности органической фазы эмульсии), обеспечивающего селективное закрепление люминофоров на алмазах и повышение контрастности спектрально-кинетических характеристик алмазов и минералов кимберлита и, соответственно, повышение извлечения алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации.
5. Разработан способ повышения извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов, включающий гидрофобизацию люминофора ФЛ-530, приготовление водоорганической эмульсии, содержащей растворенные и диспергированные в органической фазе люминофоры (антрацен и ФЛ-530), обработку алмазосодержащих продуктов с последующей отмывкой, регенерацию и возврат эмульсии в процесс, обеспечивающий направленное модифицирование спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов, их идентификацию в процессе рентгенолюминесцентной сепарации и полноценное извлечение в концентрат при выходе кимберлита не более 1,3%.
6. Разработанный технологический режим подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу РЛС с обработкой исходного питания люминофорсодержащими эмульсиями прошел полупромышленные испытания с использованием рентгенолюминесцентных сепараторов ЛС-Д-4-03Н, показал возможность повышения

извлечения алмазов в концентрат и рекомендован к промышленному освоению на обогатительной фабрике №14 Айхальского ГОКа АК «АЛРОСА» с ожидаемым годовым экономическим эффектом 45,7 млн. руб.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих трудах:

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящие в наукометрическую базу WoS и Scopus:

1. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Морозов В.В., Ковальчук О.Е., и др. Исследование механизма и выбор режимов селективного закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. -№1. С. 104-113.

2. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. и др. Экспериментальное обоснование состава люминофорсодержащих композиций для извлечения не люминесцирующих алмазов // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. -2019. -№1. -С. 128-136.

3. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. и др. экспериментальное обоснование состава люминофоров для индикации алмазов в условиях рентгенолюминесцентной сепарации кимберлитовых руд // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. -2018. -№3. -С. 112-120.

4. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. Модификация свойств поверхности алмазных кристаллов в процессах переработки кимберлитовых руд // Горный инф. -аналитический бюллетень. 2015. -№3. -С. 110-122.

5. Молотков А.Е., Павлушин А.Д., Ковальчук О.Е. и др. Дефектно-примесный состав алмазов из месторождений северо-восточной сибирской платформы // Отечественная геология. -2014.- №5. -С. 74-79.

Научные статьи в изданиях, входящих в наукометрическую базу WoS и Scopus:

6. Chanturia V.A., Kovalchuk O.E., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P. Modification of Diamond Crystal Luminescence Parameters Using Luminophore-Containing Emulsions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. -2020. Pp. 459

7. Podkamennyi I.A., Dvoychenkova G.P., Kovalchuk O.E. Experimental substantiation of the relationship between the structural and chemical properties of mineral formations on natural diamonds and the composition of kimberlite ore // Proceedings of IMPC 2018. - 29th Int. Mineral Processing Congress. -2019. -Pp. 4083-4092.

8. Dvoichenkova G., Chanturiya V., Kovalchuk O., et al. Analysis of distribution of secondary minerals and their associations on the surface of diamonds and in derrivative products of metasomatically altered kimberlites // Inzynieria Mineralna. -2019. T. 2019. -№ 1. -Pp. 43-46.

Другие публикации

9. Ковальчук О.Е., Двойченкова Г.П., Морозов В.В. Оценка селективности закрепления люминофорсодержащих эмульсий на поверхности природных алмазов в условиях перемешивания рудной пульпы // В сб. Инновационные процессы

комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2020). –Апатиты. - 2020. -С. 253-255.

10. Ковальчук О.Е., Двойченкова Г.П., Морозов В.В., Подкаменный Ю.А. Исследование люминофорсодержащих эмульсий для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов // В сб. Науч. основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXV Международной науч.-техн. конф. - Екатеринбург, 2020. - С. 324-327.

11. Ковальчук О.Е., Двойченкова Г.П., Яковлев В.Н. Повышение извлечения аномально люминесцирующих алмазов методом модифицирования свойств их поверхности // В сб. Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения - 2019). –Москва. - 2019. -С. 253-255.

12. Ковальчук О.Е., Двойченкова Г.П., Подкаменный Ю.А., Яковлев В.Н. К вопросу о возможности целенаправленного регулирования интенсивности люминесценции природных алмазных кристаллов // В сб. Науч.-техн. конференции Наука и инновационные разработки – северу. МПТИ СВФУ имени М.К. Аммосова», г. Мирный. -2019. -С. 202-204.

13. Ковальчук О.Е., Двойченкова Г.П. Минералого-аналитические исследования технологических свойств природных алмазных кристаллов в условиях переработки алмазосодержащего сырья различных месторождений // В сб. Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2014). -2014.-С. 90-93.

14. Двойченкова Г.П., Стегницкий Ю.Б. Ковальчук О.Е. Результаты исследований проб отвальных хвостов обогащения алмазосодержащего сырья // Перспективы науки. -2013. -№10. -С. 246-248.