

УДК 622.7

**ВЫБОР ОРГАНИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ
В СОСТАВЕ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩИХ МОДИФИКАТОРОВ
ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЛАБОСВЕТАЮЩИХСЯ АЛМАЗОВ**

**В. В. Морозов, В. А. Чантурия, Г. П. Двойченкова,
Е. Л. Чантурия, Ю. А. Подкаменный**

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: dehmgu@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Получены зависимости спектрального распределения мощности люминесцентного излучения и спектрально-кинетические характеристики сигнала рентгенолюминесценции органических коллекторов, обосновывающие возможность их применения в составе реагентов-модификаторов. На основе комплексной оценки эффективности органических жидкостей по их адгезионной способности к алмазам и экстракционной способности к неорганическим люминофорам выбраны следующие органические коллекторы: дизельная техническая фракция, тяжелый газойль каталитического крекинга, их смеси. Установлена возможность замещения спектральных функций органических люминофоров содержащимися в органических коллекторах полиароматическими углеводородами, которые формируют интенсивный сигнал, близкий к сигналу органических люминофоров. Показана высокая эффективность реагентов-модификаторов, включающих в состав композиций органические коллекторы и гидрофобизированные люминофоры Э-515-115-Г5 и ФЛ-530-Г3. В качестве органического коллектора применялась смесь тяжелого газойля каталитического крекинга и дизельной технической фракции в соотношении 6:1–9:1. Извлечение слабо- и аномально люминесцирующих алмазов составило 80–90 %, кимберлита не более 1 %. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные реагенты-модификаторы для применения в промышленных схемах рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего материала.

Алмазы, рентгенолюминесцентная сепарация, реагенты-модификаторы, люминофоры, органический коллектор, спектрально-кинетические характеристики, экстракция, адгезия

DOI: 10.15372/FTPRI20230212

Применение технологий, позволяющих извлекать слабо- и аномально люминесцирующие алмазы при стандартных настройках рентгенолюминесцентных сепараторов является резервом повышения эффективности алмазодобывающего производства [1, 2]. С целью снижения потерь алмазов предложена технология модифицирования их спектрально-кинетических характеристик за счет селективного закрепления на поверхности алмазного кристалла композиций люминофоров [3, 4]. Технология обработки алмазосодержащего материала предполагает использование в органической жидкости специально подобранных люминофоров, селективно закрепляющихся

на поверхности алмазов и приближающих спектрально-кинетические характеристики неизвлекаемых кристаллов к значениям, обеспечивающим их извлечение в действующих схемах рентгенолюминесцентной сепарации (РЛС) [5].

Правильный выбор органического коллектора — важное условие эффективности разрабатываемой технологии. Основная задача органического коллектора — образование устойчивого агрегата “люминофор — органическая жидкость — алмаз”, который протекает по механизму гидрофобных взаимодействий в полярной среде [6, 7]. Не менее важное требование к выбираемому органическому коллектору — обладание приемлемыми спектральными характеристиками, не препятствующими достижению задачи направленного модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов за счет закрепившихся люминофоров [8].

Цель настоящей работы — исследование и выбор органических коллекторов с удовлетворительными спектральными характеристиками, экстракционной и адгезионной активностью в отношении неорганических люминофоров и алмазов, что в конечном итоге обеспечивает придание слабо- и аномально люминесцирующим алмазам требуемых спектрально-кинетических характеристик.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Спектральные характеристики органических коллекторов, люминофоров и их смесей изучались с его помощью УФ-спектрометра HSP-350UV. Получены параметры спектрального распределения мощности, отнесенной к длине волны (в размерности мкВт/г/нм), люминесцентного излучения в видимой области спектра [9]. Для измерения спектрально-кинетических характеристик органических коллекторов и композиций люминофоров (S_v — свертка; τ_3 — постоянная времени затухания; $A_{мк}$ — амплитуда медленной компоненты; $A_{бк}$ — амплитуда быстрой компоненты; K_A — отношение амплитуд компонент) применялся блок диагностики портативного сепаратора “Полюс-М” [2, 9]. При определении быстрой и медленной компонент границей сигналов принималась длительность в 1 мс [1].

Анализ взаимодействия алмазов, люминофоров и коллектора в водной среде проводился методами гетерофазной экстракции органической жидкостью и флотации дисперсной фазы [11, 12]. Для исследований использовалась специально сконструированная установка, описанная подробно в соответствующем разделе настоящей статьи.

Эффективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и минералов кимберлита определялась по изображению изучаемых объектов в ультрафиолетовом свете [13]. С этой целью использовался люминескоп “Луч-1Ф”, оснащенный источниками УФ-излучения с длиной волны 273 и 365 нм. Получаемые сведения диагностировались визиометрическим анализом, позволяющим оценить интенсивность люминесценции и распределение люминофора на поверхности анализируемых образцов [14]. Изображения алмазов и минералов кимберлита обрабатывались программой “ВидеоТест 4.0” [15].

Эффективность выбранных составов реагентов-модификаторов оценивалась по результатам разделения материала на концентрат, содержащий алмазные кристаллы, и хвосты с минералами кимберлита. Для этого применялся сепаратор “Полюс-М” в режимах, соответствующих настройкам промышленных рентгенолюминесцентных сепараторов [16, 17].

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ

Ранее в качестве критерия устойчивого энергетического состояния гетерофазной системы “твердое (алмаз, люминофор) — органическая жидкость — водная фаза” принимался трехфазный краевой угол смачивания. В качестве перспективных коллекторов выбраны органические жидкости, включающие предельные и непредельные олефины, дизельное топливо различных марок, керосин, прямоточные и вакуумные газойли и др. [7].

Анализ кривых спектрального распределения мощности люминесцентного излучения исследованных органических жидкостей показал, что максимум излучения лежит в диапазоне длин волн 470–600 нм (рис. 1) и полностью соответствует разрешенному диапазону частот детекторов светового излучения фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 350–550 нм, используемых РЛС [16].

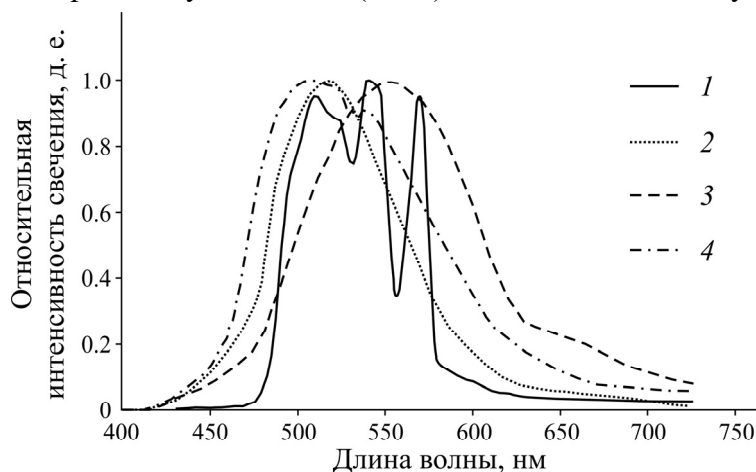


Рис. 1. Спектры люминесценции неорганических люминофоров: 1 — ФЛ-530; 2 — Э-515-115 и органических коллекторов: 3 — дизельная техническая фракция; 4 — тяжелый газойль каталитического крекинга

Результаты измерений спектральных характеристик проб люминофоров (20 мг) и органических коллекторов (100 мг) на УФ-спектрометре HSP-350UV показали, что приведенная к длине волны интенсивность сигнала рентгенолюминесценции исследованных органических коллекторов, отнесенная к единице массы, в 20–50 раз меньше, чем у неорганических люминофоров. Однако необходимо принимать во внимание, что абсолютно несветящихся алмазов не существует, здесь имеются в виду кристаллы, обладающие недостаточной светимостью для их обнаружения и извлечения [18]. Учитывая фактическое соотношение масс люминофоров и коллектора в закрепившейся на алмазе композиции (1:10–1:20), интенсивности сигнала от коллектора и люминофора вполне сравнимы. Следовательно, сигнал необходимо рассчитывать как сумму сигналов от алмаза, коллектора и люминофора. Установленная по параметру H (оттенок цвета в формате HSL) длина волны спектра люминесценции отличается от длины волны, воспринимаемой ФЭУ сепаратора, вследствие считывания последним сигнала только в интервале длин волн 350–550 нм (табл. 1).

Измерение спектрально-кинетических характеристик люминофорсодержащих композиций проводилось для смеси 0.005 мл органического коллектора и 0.5 мг неорганического люминофора, что соответствовало массе композиции, закрепляющейся на алмазе крупностью 3 мм и покрывающей поверхность на 15 %.

Анализ кинетических кривых исследованных органических коллекторов показывает, что форма сигнала рентгенолюминесценции характеризуется отличием амплитуды быстрой компоненты $A_{бк}$ и слабовыраженной медленной компонентой $A_{мк}$ от характеристики природного алмаза (рис. 2). Степень отклонения D_v формы сигнала рентгенолюминесценции коллекторов относительно сигнала природного алмаза велика ($D_v = 6–8$ по шкале 1–14). Для большинства органических коллекторов характерны запредельно низкие значения свертки сигнала S_v , удовлетворительные значения постоянной времени затухания τ_z . Отмечено превышение соотношения амплитуд быстрой и медленной компонент K_A относительно верхней границы рабочего диапазона (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Спектральные характеристики люминофоров и органических коллекторов

Марка	Длина волны максимума, нм	Характеристики $H(0)$, $S(\%)$, $L(\%)$	Длина волны, воспринимаемая ФЭУ, нм	Удельная интенсивность свечения, мкВт/г/нм
Неорганические люминофоры				
ФЛ-530	530, 544, 575	149, 37.6, 63.5	520	3.850
Э-515-115(220)	515	163, 91.1, 51.4	510	5.900
ФК-110	465, 510, 545	149, 72.6, 71.2	465	6.100
ФК-1	484	225, 88.0, 45.9	466	7.600
Органические коллекторы				
ДТФ	561	115, 12.4, 45.3	545	0.370
ТГКК	506	172, 48.4, 68.9	502	0.300
ТГКК + ДТФ (4:1)	527	156, 44.5, 63.2	516	0.330
Машинное масло	535	136, 58.6, 65.2	530	0.550
Флотский мазут Ф-5	549	132, 34.0, 29.3	533	0.510
Уникол С1	526	143, 65.4, 64.2	525	0.480
Керосин	547	115, 61.4, 52.1	545	0.900
Дизельное топливо летнее	527	139, 41.1, 44.0	528	0.370
Вакуумный газойль	563	113, 36.0, 49.3	546	0.510
Гидроочищенный вакуумный газойль	563	125, 39.4, 51.9	538	0.650
Топливо судовое ДМА	535	143, 32.4, 46.5	525	0.500
Петролатум	526	244, 41.0, 56.3	524	0.037

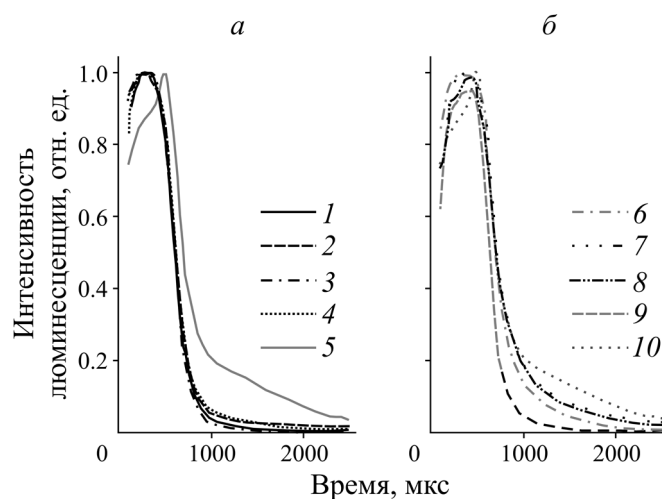


Рис. 2. Нормированные сигналы рентгенолюминесценции (а) и неорганических люминофоров на основе сульфидов цинка в органических коллекторах: 1 — ТГКК; 2 — ДТФ; 3 — топливо судовое; 4 — вакуумный газойль; 5 — природный алмаз; б — ФК-110 в ДТФ; 7 — Э-515 в ДТФ; 8 — ФК-110 в ТГКК; 9 — Э-515 в ТГКК; 10 — природный алмаз

Формы сигнала рентгенолюминесценции композиции неорганического люминофора и органического коллектора близки к форме сигнала природного алмаза (рис. 2). Степень отклонения формы сигнала рентгенолюминесценции коллекторов относительно сигнала природного алмаза невелика ($D_v = 2 - 4$ по шкале 1 – 14).

ТАБЛИЦА 2. Значения спектрально-кинетических характеристик органических коллекторов

Состав органического коллектора	S_v	τ_3 , мс	$A_{МК}$, мВ	$A_{БК} - A_B$, мВ	K_A
ДТФ	0.05	0.8	95	1142	13.0
ТГКК	0.07	0.8	144	1359	10.4
ТГК + ДТФ (4:1)	0.06	0.8	125	1249	11.0
Машинное масло	0.06	1.0	64	1177	17.8
Флотский мазут Ф-5	0.10	1.0	178	2165	13.2
Уникол С1	0.06	1.0	123	1358	12.0
Керосин	0.06	—	≤ 50	1137	≥ 50
Дизельное топливо летнее	0.06	—	≤ 50	553	≥ 50
Вакуумный газойль	0.03	0.8	175	2881	17.5
Гидроочищенный вакуумный газойль	0.10	1.2	165	2210	14.4
Топливо судовое ДМА	0.06		132	1743	14.2
Петролатум	0.09	1.0	127	1969	17.3
Разрешенные значения настроек сепаратора	0.1 – 1.0	0.1 – 10	≥ 100	—	0.5 – 12

Примечание. A_B — амплитуда быстрой компоненты сигнала рентгенолюминесценции воздуха (фон); жирным шрифтом выделены значения характеристик, лежащие вне диапазонов, разрешенных системой диагностирования алмазов в рентгенолюминесцентных сепараторах; результат идентификации: коллектор не обнаружен во всех составах

Анализ результатов данного исследования показывает, что в наименьшей степени негативное влияние на спектрально-кинетических характеристики люминофорсодержащих композиций будут оказывать тяжелый газойль каталитического крекинга и его смесь с дизельной технологической фракцией, для которых изначально характерны приемлемые значения параметра K_A (табл. 2).

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННО-ЭКСТРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧАСТИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ РЕАГЕНТОВ-МОДИФИКАТОРОВ

Основная цель исследований — выбор органических коллекторов с высокой экстракционной способностью к люминофорам и адгезионной активностью к алмазам. Методика включала обработку люминофоров в водных растворах и извлечение масляной фазой после экстракции или закрепления на границе раздела фаз “масло – вода” [11]. Изучались люминофоры различного состава, включая алюминаты стронция (АС-4, АС-8), ортосиликат (ФЛ-530) и сульфиды цинка и кадмия (ФК-110, Э-515-115, Р-530, ФК-1, ФК-2), пригодные для использования в люминофорсодержащих композициях для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов [8]. Применялась специальная установка, включающая узлы подачи органической жидкости и транспортной воды, сбора сфлотированных фракций (рис. 3).

Основной узел установки выполнен в виде изогнутой стеклянной трубки 1 с пористой диспергирующей перегородкой в нижней части 2, разгрузочного патрубка 3 и перемешивающего элемента 4. Контроль подачи коллектора обеспечивался регулируемым потоком воды в вытеснительный дозатор 10. Подаваемый в рабочую зону ячейки 1 коллектор диспергировался на капли размером 0.1 – 2 мм. В объеме и на поверхности капель коллектора закреплялись зерна люминофора или кристаллы алмазов. Вследствие меньшей плотности капли применяемого коллектора всплывали и разгружались из ячейки потоком транспортной воды из емкости 11. Сфлотированная минеральная фаза отделялась из выгружаемого из ячейки водомасляного потока в фильтрующей ячейке 13.

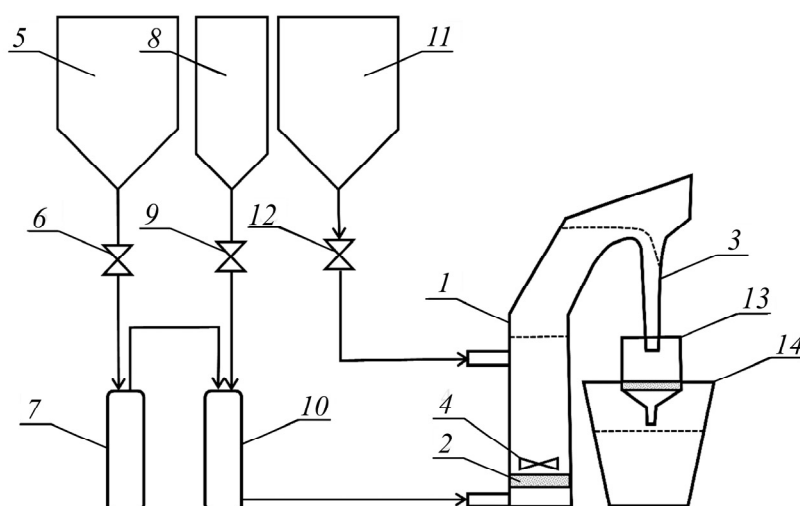


Рис. 3. Схема узлов экстракционно-флотационной установки для исследования лиофильности алмазов и люминофоров: 1 — стеклянная трубка; 2 — пористая перегородка; 3 — разгрузочный патрубок; 4 — мешалка; 5 — емкость с вытесняющей водой; 6 — регулятор расхода вытесняющей воды; 7 — вытеснитель воздуха; 8 — емкость с коллектором; 9 — кран; 10 — дозатор коллектора; 11 — емкость с транспортной водой; 12 — регулятор расхода; 13 — приемник; 14 — сборник эмульсии

Методика эксперимента включила загрузку навески люминофора или алмазов с водной фазой в рабочую зону стеклянной трубки, перемешивание суспензии, последовательную подачу коллектора и транспортной воды. В рабочей зоне осуществлялось закрепление люминофоров или алмазов на каплях коллектора, их всплытие и вынос всплывших агрегатов капель коллектора с люминофорами или алмазами потоком транспортной воды в зону разгрузки. Разгрузка происходила в емкость с фильтрующей перегородкой.

По результатам [5, 7] и данных о применении органических жидкостей в горно-обогачительных процессах [19–21], в перечень исследуемых органических жидкостей включены предельные и непредельные олефины, дизельное топливо различных марок, керосин, прямогонные и вакуумные газойли и др. (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Извлечение неорганических люминофоров органическими коллекторами и смесями, %

Коллекторы	ФЛ-530	АС-4	АС-8	ФК-110	Э-515-115	Р-530	ФК-1	ФК-2	Среднее
ДТФ	75.3	38.4	37.4	81.2	85.1	83	82	86	71.1
ТГКК	80.5	35.5	34.2	82.4	90.5	85	87.9	90.2	73.3
ТГКК+ДТФ	81.1	37.1	38.9	83.3	90.7	86.1	89.8	88.9	74.5
Машинное масло	70.8	32.2	29.7	76.5	79.4	77.3	76	78.3	65.0
Флотский мазут Ф-5	81.8	38.3	38.3	84.3	90.8	86.3	90.3	90.1	75.0
Уникол С1	67.5	31.4	28.6	72.9	71.2	75.5	73.3	74.2	61.8
Керосин	61.4	13.4	14.5	70.3	68.4	73.2	71.7	72.2	55.6
Дизельное топливо летнее	73.1	37.6	37.5	80.1	83.8	80.7	81.6	84.5	69.2
Вакуумный газойль	76.4	34.5	34	80.3	87.7	83.3	84.5	87.5	71.0
Прямогонный газойль гидроочищенный	75.2	30.4	29.4	78.3	85.5	80.2	81	84.4	68.1
Топливо судовое ДМА	73.1	33	34.4	78.5	81.2	80.3	81.6	84.4	68.3
Петролатум	68.6	25	30.3	72.3	78.8	77.4	79.9	83.0	64.4
Среднее	73.7	32.2	32.3	78.4	82.8	80.7	81.6	83.6	68.2

Анализ полученных результатов выявил, что наилучшей экстракционной способностью по отношению к исследованным люминофорам (среднее извлечение более 70 %) обладают ДТФ, ТГКК, компаунд ТГКК и ДТФ, мазут Ф-5, вакуумный газойль. Наиболее олеофильными люминофорами (среднее извлечение более 75 %) являются ФК-110, Э-515-115, Р-530, ФК-1, ФК-2. Люминофор ФЛ-530 менее олеофилен, чем люминофоры на основе сульфидов и селенидов цинка и кадмия, но более олеофилен, чем алюминаты стронция.

Аналогичным образом определялась склонность органических коллекторов к адгезионному взаимодействию с алмазами. Результаты измерений показали, что практически все исследованные органические жидкости, кроме керосина, обеспечивают достаточно эффективное закрепление и извлечение алмазов каплями коллектора.

Комплексная оценка эффективности коллекторов проводилась по коэффициенту K_{Σ} , рассчитываемому как

$$K_{\Sigma} = \varepsilon_A + \varepsilon_L - K_3 \varepsilon_K,$$

где ε_A , ε_L , ε_K — извлечение соответственно природных алмазов, люминофоров (среднее), кимберлита; K_3 — коэффициент, учитывающий влияние извлекаемого кимберлита на затраты при доводке концентрата ($K_3 = 1.5$).

На основании полученных результатов для дальнейших исследований рассматривались следующие коллекторы: ДТФ, ТГКК, компаунд ТГКК + ДТФ, мазут Ф-5, вакуумный газойль, $K_{\Sigma} > 140$ (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Извлечение алмазов и кимберлита органическими коллекторами и значения критерия эффективности, %

Коллекторы	Люминофоры (среднее)	Алмазы природные	Кимберлит	Критерий эффективности
ДТФ	71.1	76.1	2.8	143.0
ТГКК	73.3	77.5	3.0	146.3
ТГКК + ДТФ	74.5	79.5	3.1	149.3
Машинное масло	65.0	73.2	3.7	132.6
Флотский мазут Ф-5	75.0	85.5	3.3	155.5
Уникол С1	61.8	65.0	2.6	122.9
Керосин	55.6	57.8	1.9	110.5
Дизельное топливо летнее	69.2	64.5	2.6	129.8
Вакуумный газойль	71.0	84.4	3.2	150.6
Прямогонный газойль гидроочищенный	68.1	75.2	2.7	139.2
Топливо судовое ДМА	68.3	70.1	2.4	134.8
Петролатум	64.4	74.4	2.3	135.3

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОРГАНИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩИХ РЕАГЕНТОВ-МОДИФИКАТОРОВ

Результаты исследований влияния состава органических коллекторов на интенсивность сигнала рентгенолюминесценции неорганических люминофоров показали, что темноцветные нефтепродукты (мазуты и прямогонные газойли) существенно снижают интенсивность сигнала.

В связи с существенным поглощением мазутом Ф-5 и вакуумным газойлем светового сигнала от люминофоров для дальнейших исследований выбраны составы на основе дизельной технической фракции и тяжелого газойля каталитического крекинга.

С учетом [4, 5] реагент модификатор спектрально-кинетических характеристик алмазов применялся в виде эмульсии люминофорсодержащей композиции (люминофоры в органическом коллекторе) в водном растворе реагентов-регуляторов (ПАВ и диспергаторов). В составе люминофорсодержащей композиции использовались неорганические люминофоры на основе ортосиликата и сульфида цинка Э-515-115-Г4 и ФЛ-530-Г3 с повышенной олеофильностью, достигаемой путем их гидрофобизации в растворах бутилового ксантогената калия [7].

Определена возможность замены органических люминофоров коллекторами с высокой массовой долей полиароматических углеводородов. Проведено сравнение спектрально-кинетических характеристик композиций при использовании ДТФ с добавками антрацена и ТГКК без таких добавок. Установлено, что содержащиеся в ТГКК полиароматические углеводороды формируют интенсивный сигнал, близкий к сигналу антрацена, и не ухудшают спектральных параметров композиции (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Спектрально-кинетические характеристики люминофоров в органических коллекторах

Состав композиции	S_v	τ_3 , мс	A_{MK} , мВ	$A_{BK} - A_B$, мВ	K_A
ФК-110 + антрацен в ДТФ	0.14	5.1	978	4357	5.5
Э-515 + антрацен в ДТФ	0.31	2.3	1123	5936	6.3
ФК-110 в ТГКК	0.15	4.3	856	4653	6.4
Э-515 в ТГКК	0.35	2.2	1345	6067	5.5

Пр и м е ч а н и е. Обнаружена идентификация в селективном режиме для всех составов

Дальнейшие эксперименты проводились на массовых пробах алмазов (10 кристаллов) и кимберлита (1 г) с использованием сепаратора “Полюс-М”. Перед измерениями алмазы и кимберлит обрабатывались в люминофорсодержащей эмульсии различного состава. Исследования показали, что применение реагентов-модификаторов с рекомендованным составом гидрофобизированных люминофоров обеспечивает приобретение слабо- и аномально люминесцирующими алмазами спектральных характеристик, достаточных для их извлечения в концентрат рентгенолюминесцентной сепарации (табл. 6).

Выбранные реагенты модификаторы апробированы на смесях природных алмазов с кимберлитом. Затем алмазы и зерна кимберлита анализировались визиометрическим способом на люминескопе “Луч-1М” и пропускались через сепаратор “Полюс-1М” для получения сигналов рентгенолюминесценции и определения спектрально-кинетических характеристик.

Визиометрический анализ обработанных реагентами-модификаторами смесей алмазов и кимберлита показал высокую эффективность разработанных составов и технологии в целом. Наилучшие результаты достигнуты при использовании в качестве органического коллектора смеси тяжелого газойля каталитического крекинга и дизельной технической фракции в соотношении 6:1 – 9:1. В выбранном интервале соотношений компонентов коллектора наблюдается его максимальное закрепление на поверхности алмазов, покрытие кристаллов алмазов люминофорсодержащей композицией составляет 15 – 65 %.

ТАБЛИЦА 6. Результаты тестирования реагентов-модификаторов с гидрофобизированными люминофорами для обработки слабо (сл) и аномально (а) люминесцирующих алмазов

Состав композиции	Минерал	S_v	τ_3 , мс	A_{MK} , мВ	$A_{BK} - A_B$, мВ	K_A	Извлечение, %
Без использования люминофоров	Алмаз (сл)	0.15	4.3	120	564	5.7	40.0
	Алмаз (а)	—	0.1	Не изменяется	1022	≥ 50	20.0
	Кимберлит	—	—	Не изменяется	Менее 50	—	0.5
Э-515-115 + ДТФ	Алмаз (сл)	0.25	2.4	231	1345	7.7	75.0
	Алмаз (а)	0.11	0.4	59	1332	13.8	60.0
	Кимберлит	—	—	Не изменяется	156	—	0.6
Э-515-115-Г5 + + ТГКК + ДТФ (МЛА-3)	Алмаз (сл)	0.25	2.4	275	1122	5.1	90.0
	Алмаз (а)	0.17	0.6	167	1499	10.0	85.0
	Кимберлит	—	—	Не изменяется	Менее 50	—	0.7
ФЛ-530-Г3 + + антрацен + ДТФ (МЛА-2)	Алмаз (сл)	0.22	1.6	296	1336	5.5	60.0
	Алмаз (а)	0.11	0.4	209	1332	7.4	85.0
	Кимберлит	—	—	Не изменяется	Менее 50	—	0.7
ФЛ-530-Г3 + + ТГКК + ДТФ (МЛА-1)	Алмаз (сл)	0.22	1.6	329	1216	4.7	80.0
	Алмаз (а)	0.17	0.6	275	1469	6.3	90.0
	Кимберлит	—	—	Не изменяется	Менее 50	—	0.9

Наибольшая интенсивность свечения характерна для композиций на основе люминофора Э-515-115 (рис. 4), которая на 30–40 % превышает аналогичный показатель для других исследованных люминофоров.

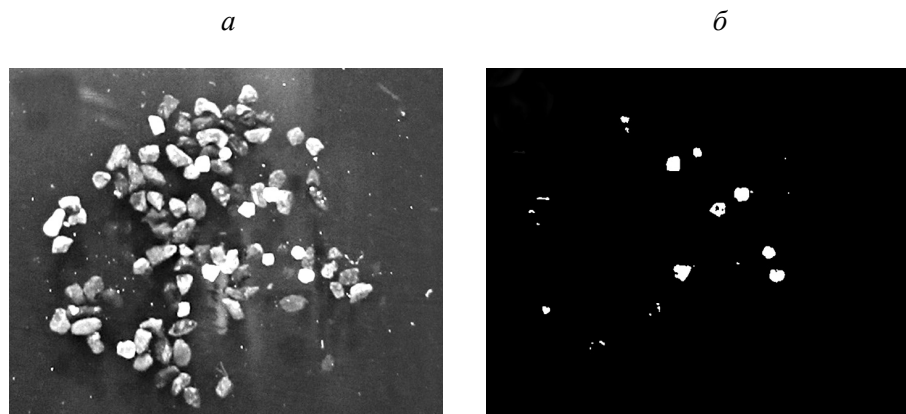


Рис. 4. Изображение смеси алмазов и кимберлита в ультрафиолетовом освещении после обработки реагентом-модификатором с композицией на основе Э-515-115 (а) и результат визиометрического анализа закрепления люминофора (б)

В данных условиях покрытие зерен кимберлита составляет не более 1–15 %, причем аномально высокое покрытие (выше 5 %) характерно только для отдельных зерен природно-гидрофобных минералов кимберлита. Результаты специальных тестов на смесях алмазов с кимберлитом, проведенных на сепараторе “Полюс-М”, показали практически полное (85–90 %) извлечение ранее неизвлекаемых слабо- и аномально светящихся алмазов при извлечении кимберлита не более 1 % (табл. 6).

По результатам проведенных исследований предложены составы реагентов-модификаторов для улучшения спектрально-кинетических характеристик алмазов различных типов. Реагенты МЛА-1 и МЛА-2 на основе гидрофобизированного люминофора ФЛ-530-ГЗ (табл. 6) предназначены для модифицирования характеристик аномально люминесцирующих алмазов путем существенного усиления медленной компоненты сигнала рентгенолюминесценции. Реагент МЛА-3 на основе гидрофобизированного люминофора Э-515-115-Г5 более эффективен для модифицирования характеристик слаболюминесцирующих алмазов. В качестве органического коллектора в составе предложенных реагентов-модификаторов применяются смеси тяжелого газойля каталитического крекинга и дизельной технической фракции. Водная фаза всех реагентов представляет собой раствор гексаметафосфата натрия и алкилсульфоната натрия.

ВЫВОДЫ

Показано, что органические коллекторы — значимая составляющая при формировании конечного сигнала рентгенолюминесценции люминофорсодержащих композиций и обработанных ими алмазов. Спектральное распределение мощности их люминесцентного излучения соответствует диапазону частот, используемых в рентгенолюминесцентных сепараторах для идентификации алмазов.

На основе комплексной оценки эффективности коллекторов по их адгезионной способности в отношении алмазов, экстракционной способности к неорганическим люминофорам и отсутствию у них эффекта поглощения люминесценции выбраны эффективные коллекторы: ДТФ, ТГКК, компаунд ТГКК + ДТФ.

Определена возможность замещения функций органических люминофоров содержащимися в органических коллекторах полиароматическими углеводородами, которые формируют интенсивный сигнал, близкий к сигналу органических люминофоров, не ухудшая спектральных параметров композиции.

Эффективные реагенты-модификаторы на основе гидрофобизированных люминофоров Э-515-115-Г5 и ФЛ-530-ГЗ, включающие в качестве органического коллектора смеси тяжелого газойля каталитического крекинга и дизельной технической фракции в соотношении от 6:1 до 9:1, рекомендованы для применения в промышленных схемах рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынович Е. Ф., Морозникова Л. В., Ключев Ю. А., Плотникова С. П. Рентгенолюминесценция природных алмазов разных типов // Вопросы теории и практики алмазной обработки. — М.: НИИМАШ, 1977. — С. 28–38.
2. Миронов В. П. Оптическая спектроскопия алмазов из концентратов и хвостов рентгенолюминесцентной сепарации // Наука и образование. — 2006. — № 1. — С. 31–36.
3. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Ковальчук О. Е., Подкаменный Ю. А., Яковлев В. Н. Исследование механизма и выбор режимов селективного закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 104–113.
4. Morozov V. V., Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., and Chanturia E. L. Stimulating modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds by hydrophobization of luminophores, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57, No. 5. — P. 821–833.

5. Чантурия В. А., Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С. Обоснование состава люминофорсодержащей композиции для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов в схемах рентгенолюминесцентной сепарации // Обогащение руд. — 2021. — № 4. — С. 27–33.
6. Liu J., Wang M., Feng F., Tang A., and Le Q. Hydrophobic and hydrophilic solid – fluid interaction, ACM Trans. Graphics, 2022, Vol. 41, No. 6. — P. 1–15.
7. Morozov V. V., Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., and Chanturia E. L. Hydrophobic interactions in the diamond – organic liquid – inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds, J. Min. Sci., 2022, Vol. 58, No. 2. — P. 257–266.
8. Chanturia V. A., Morozov V. V., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L., and Podkamenny Y. A. Modification of diamond spectrum pattern using luminophore – containing agents with zinc and cadmium chalcogenides, J. Min. Sci., 2022, Vol. 58, No. 4. — P. 599–609.
9. Пентин Ю. А., Вилков Л. В. Физические методы исследования в химии. — М.: Мир, 2003. — 683 с.
10. Сепаратор “Полюс-М”. Паспорт и инструкция по эксплуатации. — СПб., 2015. — 134 с.
11. Rutkowska M., Plotka-Wasyłka J., Sajid M., and Andruch V. Liquid-phase microextraction: A review of reviews, Microchemical J., 2019, Vol. 149. — 103989.
12. Крылов В. А., Крылов А. В., Мосягин П. В., Маткивская Ю. О. Жидкофазное микроэкстракционное концентрирование примесей // Журн. аналит. химии. — 2011. — № 4. — С. 341–360.
13. Самодуров В. П., Василенок Е. А., Еленский Ю. Н., Ероховец А. М. Цифровая ультрафиолетовая петрография: методические подходы и приложения // Журн. БГУ. География. Геология. — 2020. — № 1. — С. 86–94.
14. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. — М.: Техносфера, 2006. — 616 с.
15. Бахметьев В. В., Сычев М. М. Исследование микроструктуры сплавов с использованием компьютерной программы “ВИДЕОТЕСТ”. — СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2011. — 17 с.
16. Монастырский В. Ф., Макалин И. А. Повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья // Наука и образование. — 2017. — № 3. — С. 86–90.
17. Mironov V. P., Emelyanov A. S., Shabalin S. A., Bubyр E. V., Kazakov L. V., and Martynovich E. F. X-Ray luminescence in diamonds and its application in industry, XVII Int. Conf. on Luminescence and Laser Physics (LLPh 2019), Irkutsk, 2021. — P. 020010.
18. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. — М.: Наука, 1984. — 416 с.
19. Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И. Обогащение алмазов // Междунар. журн. экспериментального образования. — 2012. — № 2. — С. 61–61.
20. Авдохин В. М., Чернышева Е. Н. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов // ГИАБ. — 2010. — S 1. — С. 465–477.
21. Изучение механизма действия реагентов при флотационном обогащении угольных шламов // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 11. — С. 939–942.

*Поступила в редакцию 24/I 2023
После доработки 15/II 2023
Принята к публикации 16/III 2023*