



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>

УДК 622.7

**Оптимизация состава и режима применения реагентов-модификаторов спектральных характеристик алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации****В.А. Чантурия , В.В. Морозов , Г.П. Двойченкова ✉, Ю.А. Подкаменный , А.С. Тимофеев ***Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
г. Москва, Российская Федерация*✉ dvoigp@mail.ru**Аннотация**

Одним из направлений повышения эффективности процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов является применение технологии, способствующей извлечению слабо и аномально люминесцирующих алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации с применением люминофорсодержащих реагентов. Задача исследований заключалась в выборе рационального состава реагентов-модификаторов спектральных характеристик минералов и режима их применения. Основным условием эффективности процесса является интенсивное закрепление реагентов-модификаторов на кристаллах алмазов без аналогичного закрепления на поверхности кимберлита, что обеспечивается применением органических коллекторов оптимального состава, характеризующихся способностью как адгезионно закрепляться на поверхности алмазов, так и удерживать зерна неорганических люминофоров. Оценка эффективности закрепления люминофоров выполнена с использованием методики визиометрического анализа в УФ излучении. Оценка способности алмазов удерживать на поверхности капли или пленки коллектора с люминофорами выполнена с использованием методики измерения величины трехфазного краевого угла смачивания. Спектрально-кинетические характеристики алмазов и их извлечение в процессе рентгенолюминесцентной сепарации были определены на сепараторе «Полус-М». В результате проведенных исследований установлена возможность целенаправленного модифицирования спектральных характеристик слабо и аномально светящихся алмазов люминофорсодержащими композициями на основе сульфидов цинка и ортосиликата цинка. С использованием критерия селективности закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах и минералах кимберлита, рассчитываемого по величинам измеренных поверхностных концентраций люминофоров на минералах, определены оптимальные соотношения между массами неорганического люминофора, органического коллектора и водной фазы применяемой эмульсии. Выбраны реагенты-диспергаторы, обеспечивающие селективное закрепление люминофоров на алмазных кристаллах. Установлены рациональные параметры состава органического коллектора. Определены границы температурного режима процесса обработки алмазосодержащего материала. В результате стендовой апробации реагентов модификаторов выбранного состава и режимов их применения в цикле обработки алмазосодержащего материала перед процессом РЛС установлена возможность достижения извлечения аномально и слабо люминесцирующих алмазов более чем на 90 % при значениях выхода кимберлита в концентрат, не превышающих 1 %.

Ключевые слова

алмазы, кимберлит, спектральные характеристики, люминофоры, реагент-модификатор, селективность, люминесценция, сепарация

ФинансированиеИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21–17–00020, <https://rscf.ru/project/21-17-00020/>.**Для цитирования**Chanturiya V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Podkamennyi Yu.A., Timofeev A.S. Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation

V.A. Chanturiya  , V.V. Morozov  , G.P. Dvoichenkova   ,Yu.A. Podkamennyi  , A.S. Timofeev  *Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation* dvoigp@mail.ru

Abstract

One of the research areas focused on improving the efficiency of diamond-bearing kimberlite beneficiation processes involves the utilization of technology aimed at enhancing the recovery of weakly and anomalously luminescent diamonds during the X-ray luminescence separation process using luminophore-containing chemical agents. The objective of this research was to select the optimal composition of agents that modify the spectral characteristics of minerals and the conditions for their application. A crucial factor for process efficiency is the effective attachment of modifying agents to diamond crystals while avoiding similar attachment to kimberlite mineral surfaces. This is achieved through the use of organic collectors with an optimal composition, characterized by their ability to both adhere to the diamond surface and retain inorganic luminophore grains. The evaluation of luminophore attachment efficiency was performed using visimetric analysis in the UV range. The capability of diamonds to retain luminophore collector droplets or films on their surfaces was evaluated using a technique to measure the three-phase limiting wetting angle. The spectral and kinetic characteristics of diamonds and their recovery during the X-ray luminescence separation process were determined using a separator “Polyus-M”. The feasibility of purposefully modifying the spectral characteristics of weakly and anomalously luminescent diamonds through luminophore-containing compositions based on zinc sulfides and zinc orthosilicate has been confirmed through the conducted studies. By considering the criterion of selectivity in the attachment of luminophore emulsion to diamonds and kimberlite minerals, calculated based on the measured surface concentrations of luminophores on the minerals, the optimal ratios between the masses of inorganic luminophore, organic collector, and the aqueous phase of the emulsion were determined. Dispersing agents that offer selective binding of luminophores to diamond crystals were identified, and rational parameters for the composition of the organic collector were established. The temperature range for treating diamond-containing material was defined. As a result of bench testing the modifying agents with the selected composition and conditions for their application in the diamond-containing material treatment cycle before XRF separation, it was confirmed that the recovery of anomalously and weakly luminescent diamonds could exceed 90%, while keeping the yield of kimberlite minerals in the concentrate below 1%.

Keywords

diamonds, kimberlite, spectral characteristics, luminophores, modifying agent, selectivity, luminescence, separation

Financing

The research was carried out at the expense of grant No. 21 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/17-00020>.

For citation

Chanturiya V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Podkamennyi Yu.A., Timofeev A.S. Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>

Введение

Важным ресурсом повышения эффективности алмазоизвлекающих предприятий является снижение т.н. методических потерь алмазов, связанных с принципиальными и существенными отклонениями параметров сырья от настроек применяемого оборудования. Для рентгенолюминесцентной сепарации причинами методических потерь алмазов являются

особенности их состава и строения, влияющие на отсутствие или, напротив, чрезмерную концентрацию дефектов кристаллической решетки или примесей, вызывающих характерное свечение в рентгеновских лучах [1, 2].

Перспективным направлением повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазов является разработка технологий модифици-



рования их спектральных характеристик с применением люминофорсодержащих реагентов-модификаторов [3, 4]. Разработанная технология направлена на извлечение слабо и аномально люминесцирующих кристаллов, спектральные характеристики которых характеризуются малой интенсивностью рентгенолюминесценции или существенно отличаются от характеристик основной массы алмазов.

Основу реагентов-модификаторов составляют люминофорсодержащие композиции, содержащие неорганические и органические люминофоры, характеристики которых обеспечивают необходимое изменение кинетических параметров сигнала рентгенолюминесценции алмаза [5].

Основным требованием при выборе люминофоров для реализации разработанной технологии является возможность придания алмазам параметров сигнала рентгенолюминесценции, приближающихся к характеристикам природных кристаллов и соответствующих разрешенным диапазонам настроек детекторов в рентгенолюминесцентных сепараторах.

Важным условием повышения эффективности разработанной технологии [3–5] является обеспечение селективного режима закрепления реагентов-модификаторов на кристаллах алмазов, заключающегося в поддержании достаточного уровня закрепления люминофоров на алмазах при минимальном их закреплении на поверхности кимберлита. Реализация поставленного условия, выбранного в качестве основного подхода к решению поставленных задач, достигается экспериментально обоснованным выбором компонентов органических коллекторов, входящих в состав композиции реагентов-модификаторов и характеризующихся способностью как селективно закрепляться на поверхности алмазов, так и удерживать в своем объеме зерна неорганических люминофоров. Для определения селективности закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита была разработана методика визиометрического анализа [4].

Необходимая устойчивость агрегатов алмаз – коллектор – люминофор достигается применением гидрофобизирующей обработки неорганических люминофоров, а также выбором состава используемых в качестве коллекторов органических жидкостей [6]. Оценка адгезионной способности коллектора по отношению к поверхности алмаза, определяющей способность алмазов удерживать на своей поверхности люминофорсодержащую композицию, достигается с применением методики измерения величины трехфазного краевого угла смачивания в системе минерал – капля коллектора – водная среда [7].

Конечной целью исследований был выбор параметров реагентов-модификаторов и режимов их применения, обеспечивающих необходимую селективность процесса рентгенолюминесцентной сепарации. Поставленная цель достигалась путем выбора рациональных составов реагентов, применимых для модифицирования характеристик основных типов неизвлекаемых алмазов, включая определение состава

и массовых соотношений люминофоров, коллектора и водной фазы, определение состава органического коллектора и выбор селективных режимов закрепления люминофоров на кристаллах алмазов, включающих применение реагентов-диспергаторов органической фазы и регуляторов закрепления коллектора на минералах кимберлита.

Методики исследований

Обработку алмазосодержащих кимберлитовых продуктов реагентом-модификатором проводили в специальной установке, разработанной и изготовленной в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда № 21–17-00020.

Интенсивность закрепления люминофоров на алмазах оценивали по величине их поверхностной концентрации, которую измеряли методами люминесцентной и комбинированной (ультрафиолет – видимый свет) микроскопии, обеспечивающими наблюдение и регистрацию изображений элементов люминофорсодержащей композиции с применением эффекта фотолюминесценции [8, 9]. В настоящих исследованиях использован люминесцентный микроскоп «Микромед 3 ЛЮМ».

Влияние реагентов-регуляторов на гидрофобность и олеофильность поверхности алмазов и гидрофобных минералов кимберлита оценивали методом измерения краевых углов смачивания [10], при использовании которого первоначально поверхность минералов обрабатывается исследуемой водной системой, после чего на обработанную поверхность наносится капля органического вещества, и добавками водной фазы обеспечивается повышение уровня раздела фаз вода–воздух. Затем измеряются краевой угол смачивания и размер капли в системе минерал – капля коллектора – водная фаза.

Измерения проводили на установке «OCA 15EC Package 1» с модулем прямого дозирования SD-DM и обработкой результатов измерений при помощи пакета SCA 20.

Эффективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и минералов кимберлита оценивали по изображениям люминесценции исследуемых объектов в ультрафиолетовом излучении с использованием прибора УФК-254/365, оснащенного источниками УФ-излучения с длиной волны 254 и 365 нм. Полученные изображения диагностировали визиометрическим методом анализа, позволяющим оценить концентрацию и характер распределения люминофора на поверхности анализируемых образцов [2, 4].

Для определения спектрально-кинетических характеристик алмазов и кимберлита и извлекаемости алмазов был использован портативный рентгенолюминесцентный сепаратор «Полюс-М», возможности которого полностью соответствовали настройкам промышленных рентгенолюминесцентных сепараторов [11, 12]. Встроенная аналого-цифровая система регистрации сепаратора «Полюс-М» обеспечивала ведение процесса сепарации в «селективном» режиме, предполагающем использование кинетических

характеристик сигнала рентгенолюминесценции: свертку Sv ; постоянную времени затухания τ_z , амплитуду медленной компоненты $A_{МК}$, амплитуду быстрой компоненты $A_{БК}$, отношение амплитуд компонент K_A [4, 12].

Обсуждение результатов

1. Обоснование технологических параметров применяемых люминофоров и композиций

Особенностью проводимых исследований было применение для специализированной лабораторной установки, обеспечивающей функции обработки алмазосодержащего материала реагентом-модификатором, отделения кондиционной эмульсии и промывки обработанного материала перед операцией РЛС (рис. 1).

Применение вышеописанной установки позволяет проводить обработку и разделение алмазосодержащего материала в условиях, близких к промышленным. Методика проведения экспериментов включала обработку смеси минералов в эмульсии реагента модификатора в течение 1 мин, промывку водой в течение 30 с, подсушивание, визиометрический анализ и снятие спектрально-кинетических характеристик на сепараторе «Полус-М».

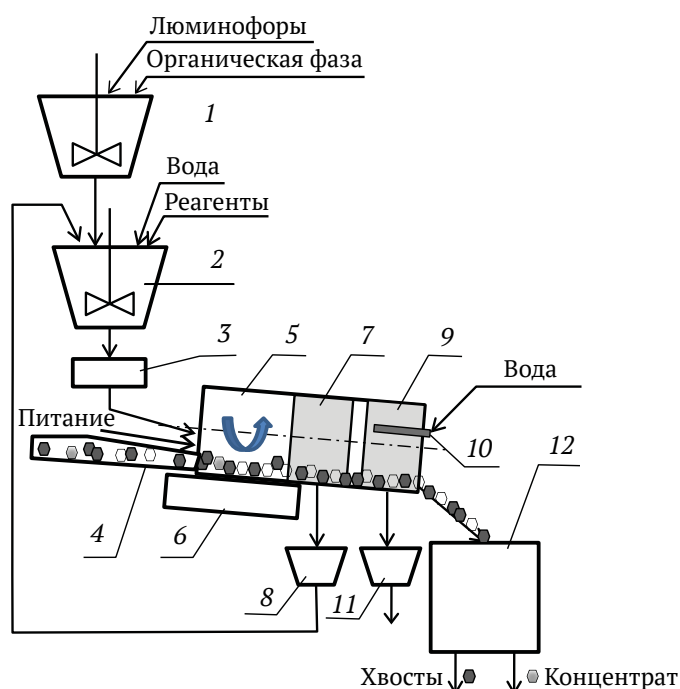
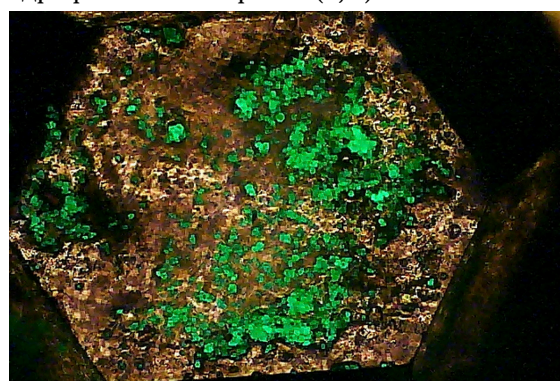
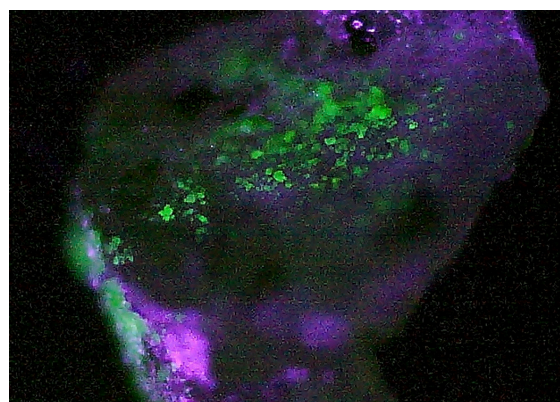


Рис. 1. Схема установки для исследования технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу РЛС с использованием реагентов-модификаторов, где 1 – узел приготовления композиции; 2 – узел приготовления эмульсии; 3 – приспособление для нагревания эмульсии; 4 – загрузочное приспособление; 5 – узел обработки алмазосодержащего материала эмульсией; 6 – валковый привод; 7 – перфорированный участок для отвода кондиционной эмульсии; 8 – приемник эмульсии; 9 – перфорированный участок для отделения промывной воды; 10 – распределитель промывной воды; 11 – приемник промывной воды; 12 – рентгенолюминесцентный сепаратор

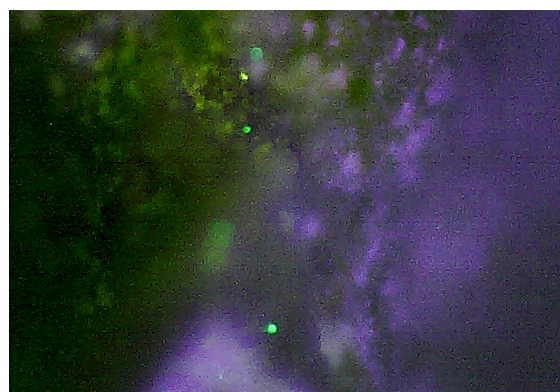
Применяемая установка обеспечивала хороший контакт эмульсии с поверхностью алмазов и закрепление на ней люминофорсодержащей композиции. Результаты исследований процессов распределения и закрепления люминофоров на поверхности кристаллов алмазов, проведенных с использованием микроскопа Микромед-3-Люм, показали, что как на синтетических, так и на природных алмазах наиболее интенсивное закрепление люминофоров наблюдается в области неровностей кристалла (рис. 2, а, б). На поверхности минералов кимберлита наблюдается точечное скопление люминофоров, обусловленное закреплением органического коллектора на природно-гидрофобных минералах (2, в).



а



б



в

Рис. 2. Изображения в комбинированном освещении поверхности исследуемых минералов с закрепившимся люминофором (люминофор – зеленый): а – синтетический алмаз, б – природный алмаз, в – зерна кимберлита



В качестве основного технологического критерия при выборе композиций люминофоров и коллектора была принята возможность придания алмазам необходимых для их обнаружения спектрально-кинетических характеристик. Критерием оптимальности состава люминофорсодержащей композиции был принят уровень приближения формы сигнала рентгенолюминесценции к форме сигнала природного алмаза. Принятое условие иллюстрируется графиками на рис. 3, где показано, что применение реагентов модификаторов различного состава (МЛА-1 – на основе ФЛ-530; МЛА-3 – на основе Э-515-115) придает кинетическим кривым сигнала рентгенолюминесценции отличающуюся форму, при этом в рассматриваемых условиях получаемые характеристики приближаются к характеристикам природных нормально извлекаемых алмазов.

Выбор люминофоров для исследуемых композиций учитывал необходимость требуемого изменения спектральных характеристик обоих типов неизвлекаемых алмазов (слабо и аномально люминесцирующих), для которых ранее была показана перспективность применения люминофоров на основе ортосиликата цинка и сульфидов цинка и кадмия [6]. В настоящем исследовании ставилась задача подтверждения и оценки эффективности выбранных составов реагентов-модификаторов для рассматриваемых типов неизвлекаемых алмазов.

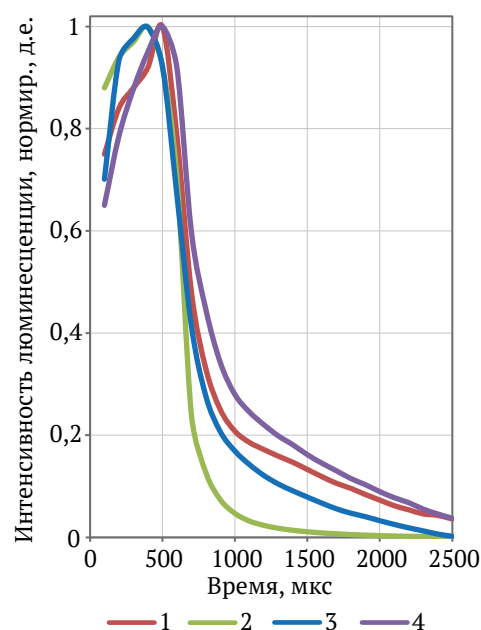


Рис. 3. Спектрально-кинетические характеристики алмазов до и после обработки: 1 и 2 – исходные нормально и аномально люминесцирующие алмазы соответственно; 3 и 4 – аномально люминесцирующие алмазы после обработки реагентами-модификаторами МЛА-1 и МЛА-3 соответственно

Таблица 1

Изменение спектрально-кинетических характеристик алмазов при обработке реагентами-модификаторами различного состава

№	Минерал	Компонента	До обработки	После обработки	Прирост	К _А до обработки	К _А после обработки
МЛА-1 (ФЛ-530-Г3 в ТГКК и ДТФ)							
1	Алмаз слабо люминесцирующий	A _{МК}	109	574	465	3,88	1,27
		A _{БК}	423	730	307		
2	Алмаз аномально люминесцирующий	A _{МК}	287	688	401	21,01	9,23
		A _{БК}	6030	6353	323		
МЛА-2 (ФЛ-530-Г3 и антрацен в соотношении 25–40 : 1 в ТГКК и ДТФ)							
3	Алмаз слабо люминесцирующий	A _{МК}	102	545	443	4,20	2,01
		A _{БК}	428	1095	667		
4	Алмаз аномально люминесцирующий	A _{МК}	287	810	523	21,25	8,66
		A _{БК}	6100	7011	911		
МЛА-3 (Э-515-115-Г5 в ТГКК и ДТФ)							
5	Алмаз слабо люминесцирующий	A _{МК}	100	488	388	4,00	4,80
		A _{БК}	400	2340	1940		
6	Алмаз аномально люминесцирующий	A _{МК}	347	720	383	17,64	10,18
		A _{БК}	6120	7330	1210		
МЛА-4 (ФК-110-Г5 в ТГКК и ДТФ)							
7	Алмаз слабо люминесцирующий	A _{МК}	110	455	345	3,83	4,29
		A _{БК}	421	1954	1533		
8	Алмаз аномально люминесцирующий	A _{МК}	326	647	321	18,53	10,83
		A _{БК}	6040	7008	968		
МЛА-5 (ФК-1 в ТГКК и ДТФ)							
9	Алмаз слабо люминесцирующий	A _{МК}	109	425	316	3,65	5,09
		A _{БК}	398	2163	1765		
10	Алмаз аномально люминесцирующий	A _{МК}	339	695	256	17,55	10,10
		A _{БК}	5950	7020	1070		

Результаты исследований влияния состава используемых люминофоров на результирующие спектрально-кинетические характеристики алмазов, представленные в табл. 1 и на рис. 4, позволили оценить технологическую возможность и эффективность применения основных типов реагентов-модификаторов в цикле обработки алмазосодержащего материала перед процессом РЛС.

Как видно из представленных данных, в отношении слабо люминесцирующих алмазов наилучшие результаты показали композиции люминофоров реагентов модификаторов МЛА-3 и МЛА-4 на основе сульфидов цинка, что подтверждается диаграммой рис. 3, из которых следует, что результирующие спектрально-кинетические характеристики слабо люминесцирующих алмазов после обработки существенно смещаются в область обнаружения за счет прироста амплитуд быстрой и медленной компонент.

Лучший результат в отношении аномально люминесцирующих алмазов наблюдается для реагентов МЛА-1 и МЛА-2 (на основе ортосиликата цинка). Однако результирующий сигнал обработанных реагентом МЛА-1 алмазов по соотношению быстрой и медленной компонент на слабо люминесцирующих алмазах лежит вблизи границы зоны обнаружения (см. рис. 4, линия 4).

При одновременном присутствии в исходном алмазосодержащем продукте алмазных кристаллов обоих типов наиболее эффективными для целенаправленного модифицирования их люминесцентных свойств будут реагенты МЛА-2 и МЛА-3, поскольку обеспечивают алмазам спектрально-кинетические характеристики, лежащие в глубине разрешенных значений зоны идентификации системы детектирования (см. рис. 4).

Отдельный цикл исследований посвящен экспериментальному обоснованию оптимального фракционного состава органического коллектора, обеспечивающего максимальное закрепление люминофорсодержащей композиции на алмазах. Для выявления закономерностей влияния фракционного состава органического коллектора на основе ТГКК и ДТФ на эффективность закрепления люминофоров и обоснованного выбора состава реагента был проведен комплекс физико-химических исследований, включающий измерение адгезионной активности коллектора как основного воздействующего фактора. Для оценки и сравнения адгезионной активности использовались результаты измерения краевого угла смачивания в системе алмаз – капля коллектора – водная фаза.

Анализ результатов исследований показал, что увеличение доли ДТФ в коллекторе вызывает рост

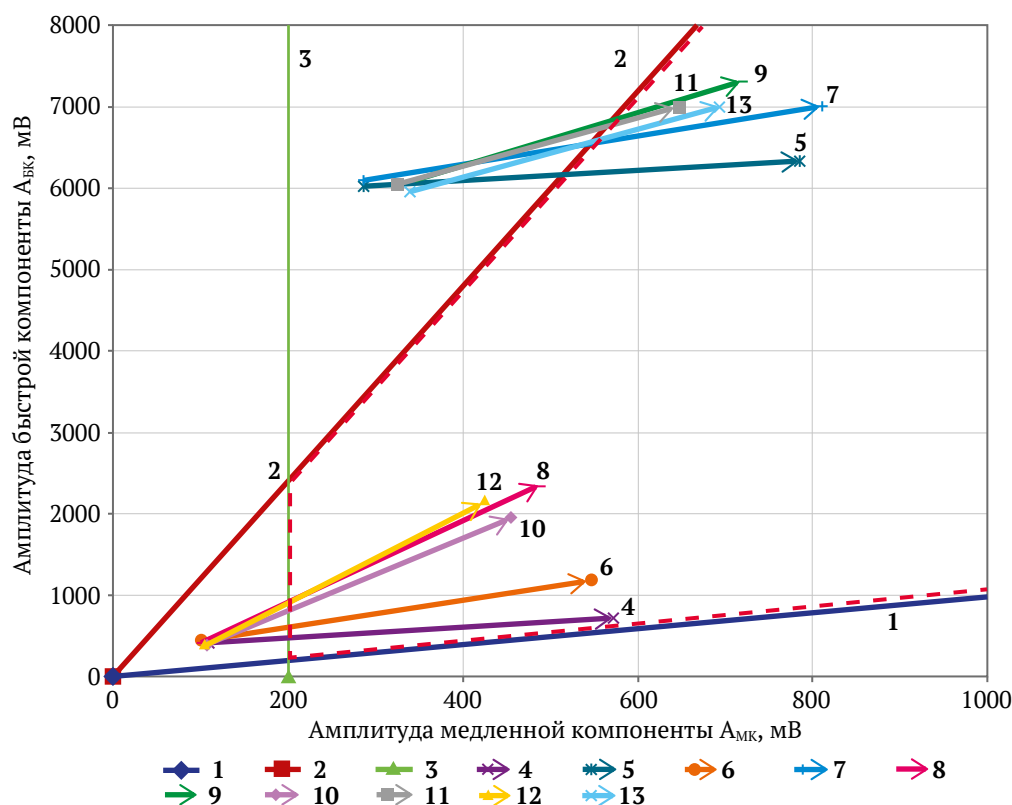


Рис. 4. Диаграмма изменения амплитудных спектрально-кинетических характеристик неизвлекаемых алмазов после обработки люминофорсодержащими реагентами-модификаторами:

1 – нижняя граница области положительной идентификации алмазов по K_A ; 2 – верхняя граница области положительной идентификации алмазов по K_A ; 3 – граница области положительной идентификации алмазов по $A_{МК}$; 4, 6, 8, 10, 12 – смещение характеристик слабо люминесцирующих алмазов; 5, 7, 9, 11, 13 – смещение характеристик аномально люминесцирующих алмазов после обработки; 4, 5 – МЛА-1; 6, 7 – МЛА-2; 8, 9 – МЛА-3; 10, 11 – МЛА-4; 12, 13 – МЛА-5; [] – область положительной идентификации (обнаружения)



величины краевого угла смачивания, характеризующего его адгезионную активность. Однако, несмотря на увеличение краевого угла смачивания, при росте массовой доли ДТФ в компаунде выше 15 % происходит уменьшение размера капли коллектора, сохраняющейся на поверхности алмаза после подъема уровня жидкости (табл. 2).

Такой результат обусловлен в основном следующими факторами: снижением вязкости коллектора и, соответственно, уменьшением гистерезисного эффекта, а также снижением плотности и, соответственно, увеличением силы отрыва при подъеме уровня жидкости.

Экстремальная форма зависимости интенсивности закрепления люминофора от массовой доли ДТФ в органическом коллекторе согласуется с аналогичным характером зависимости размера удерживаемой капли коллектора на поверхности минерала от состава компаунда (см. табл. 2). Вероятной причиной такой закономерности является определяющая роль количества органического коллектора, закрепляющегося на поверхности алмаза. Чистый ТГКК характеризуется меньшей адгезионной активностью по отношению к поверхности алмаза, чем компаунды с ДТФ, что обуславливает меньшее количество закрепленной композиции и, соответственно, меньшее количество люминофора на алмазе. Повышение доли ДТФ в коллекторе более 15 % ведет к отрыву капли с поверхности алмаза как вследствие увеличивающейся разности плотностей относительно водной фазы (плотность ДТФ – 0,867 г/см³, плотность ТГКК 0,965 г/см³, воды – 1 г/см³), так и за счет уменьшения вязкости (на 45–58 %), что снижает гистерезисную устойчивость агрегатов минерал – коллектор в турбулентной среде.

2. Выбор режимов повышения селективности закрепления люминофоров на поверхности алмазов и минералов кимберлита

Для решения задачи повышения селективности закрепления люминофоров на поверхности алмазов было исследовано применение реагентов класса полифосфатов, силикатов, природных органических полимеров, лигносульфонатов, способствующих по-

давлению закрепления аполярных и слабо полярных реагентов на гидрофобных минералах [13, 14]. Выполнено экспериментальное обоснование и проведен выбор параметров водной фазы эмульсии реагента-модификатора (рН среды, минерализация, Eh), способствующих более селективному закреплению аполярных и слабо полярных реагентов на минералах [15, 16].

Применение в настоящих исследованиях для диспергирования органической фазы реагента модификатора поверхностно-активных веществ (алкилсульфаты, алкилсульфонаты) обусловлено механизмом их влияния на свойства поверхности алмазов. Согласно положениям физико-химии растворов гетерополярные молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности раздела фаз алмаз – вода и коллектор – вода, ориентируясь аполярным радикалом в гидрофобную фазу и полярной группой в водную фазу, и уменьшают величины межфазных поверхностных натяжений твердое–жидкое $\sigma_{т-ж}$ и вода–коллектор $\sigma_{ж-к}$, что в соответствии с уравнением Юнга [17] ведет к уменьшению краевого угла смачивания, то есть поверхность твердого тела смачивается раствором ПАВ сильнее по сравнению с чистой водой. Такой эффект был подтвержден экспериментально в системе минерал – органический коллектор – водная фаза. Было показано, что добавки алкилсульфоната приводят к снижению гидрофобности поверхности минералов (рис. 5, а) [18]. Напротив, для гидрофильных минералов, вследствие обратной ориентации молекул ПАВ, возможна гидрофобизация поверхности [19], что является негативным фактором вследствие увеличения олеофильности минералов кимберлита, способствующей закреплению на них люминофорсодержащей композиции.

Действие полифосфатов на дисперсную систему минерал – водная фаза – коллектор происходит иначе. Основной действия полифосфатов является их закрепление на поверхности природно-гидрофильных минералов по механизму катионного обмена, когда образуется прочная химическая связь с двухзарядными катионами минерала (кальций, железо, магний) [20, 21]. Эффективное действие полифосфатов натрия также объясняется интенсивной адсорбцией поли-

Таблица 2

Изменение физико-химических характеристик и эффективности закрепления на алмазах при варьировании его фракционного состава органических коллекторов

№	Доля ДТФ в компаундном коллекторе	Краевой угол смачивания, град	Плотность, г/см ³	Динамическая вязкость измеренная, мПа с, 24 °С	Средний размер капли на алмазе, мм	Поверхностная концентрация люминофора, %
1	0 (только ТГКК)	85	965,0	167,0	1,5	16,9
2	5	87,5	961,1	154,5	1,65	21,7
3	10	90,0	957,2	133,0	1,62	24,4
4	15	92,0	951,3	110,3	1,33	24,5
5	20	93,3	947,4	92,1	0,96	22,1
6	25	94,3	942,5	72,0	0,75	20,4
7	30	95,0	937,6	64,1	0,65	18,6
8	100	97,5	867,0	3,64	0,4	15,5



фосфат-ионов на границе слоев кремнекислородных тетраэдров (например, природно-гидрофобных слоистых алюмосиликатов), что обусловлено сходством строения и размеров анионов триполифосфата и кремнекислородных тетраэдров глинистых минералов [22]. Полифосфаты позволяют также гидрофилизировать поверхность фосфатных минералов.

Результаты исследований показали принципиально иное влияние гексаметафосфата на поверхностные свойства минералов в сравнении с алкилсульфатами. Уменьшение величины краевого угла смачивания на алмазе выражено в существенно меньшей степени и, напротив, наблюдается весьма интенсивная гидрофизация поверхности флогопита (рис. 5, б). Гидрофобизации и повышения олеофильности природно-гидрофильных минералов кимберлита при добавках гексаметафосфата не происходит (капля органической жидкости отрывается от минерала).

Органические полимеры, например карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), проявляют регулирующие свойства в отношении как поверхности алмаза, так

и гидрофобных минералов кимберлита, что вытекает из существенного снижения краевого угла смачивания (на 10–23°) на этих минералах при увеличении концентрации реагента до 3 г/л (рис. 6, а). Более перспективны реагенты группы алкилфосфонатов. Измерения краевого угла смачивания показали, что в интервале концентраций от 0 до 1 г/л эти реагенты (на примере оксиэтилендифосфоновой кислоты – ОЭДФ) способствуют существенному снижению гидрофобности (олеофильности) флогопита, в то время как состояние поверхности алмаза изменяется в существенно меньшей степени (рис. 6, б). Во многом эта особенность может быть следствием образования координационной связи между анионами реагента и катионами Са и Mg кристаллической решетки минералов.

Полученные результаты позволили сделать вывод о целесообразности применения реагентов-диспергаторов, не содержащих в своей структуре значительного аполярного радикала и взаимодействующих с минералами кимберлита посредством образования химических или координационных связей.

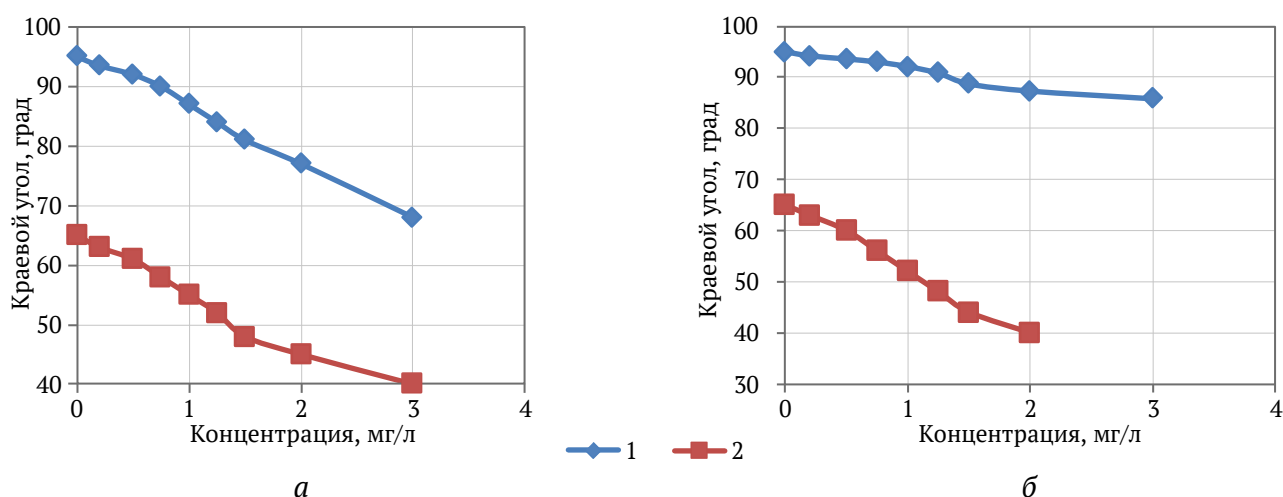


Рис. 5. Влияние концентрации алкилсульфата (а) и гексаметафосфата (б) на краевые углы смачивания алмаза (1) и флогопита (2)

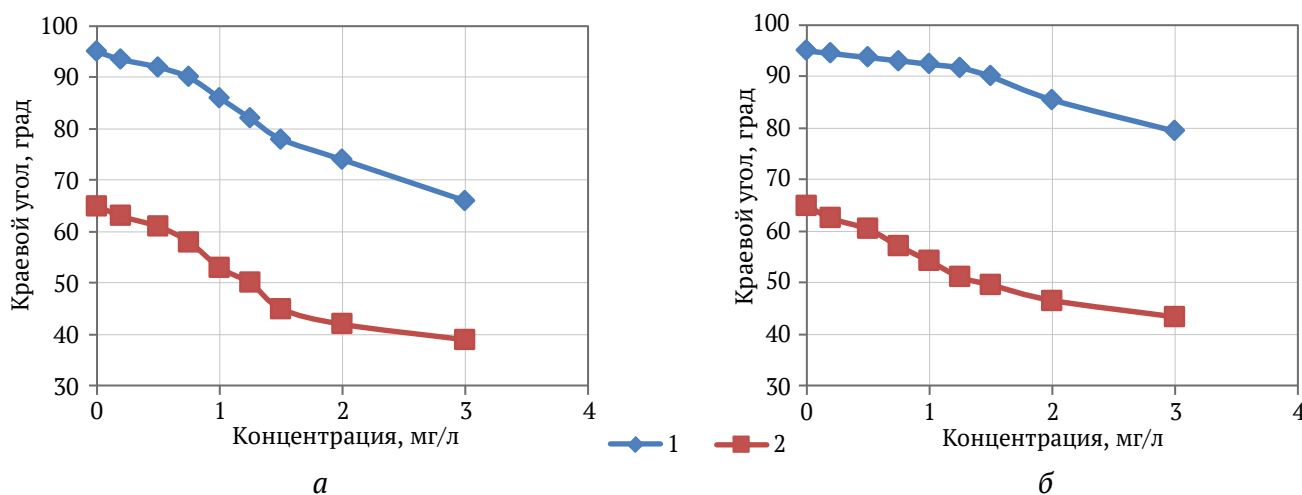


Рис. 6. Влияние концентрации в водной фазе эмульсии реагента-модификатора КМЦ (а) и ОЭДФ (б) на краевой угол смачивания алмаза (1) и флогопита (2)



Проверка выбранных диспергаторов в лабораторных условиях показала их эффективность. Наилучшие результаты при расходе реагента 1,5 г/л (наибольшая селективность закрепления люминофоров) установлены для оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), гексаметафосфата, метасиликата и триполифосфата натрия (табл. 3).

Селективность закрепления рассчитывалась по уравнению

$$СЗЛ_{AK} = \frac{C_{ЛА}}{15} - \frac{C_{ЛК}}{3}.$$

Обозначения переменных в уравнении приведены в табл. 3.

3. Выбор температурного режима обработки алмазосодержащих продуктов реагентами-модификаторами

Температура среды в операции приготовления и обработки алмазосодержащего материала реагентом-модификатором в существенной мере влияет на интенсивность и селективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита. При-

чиной существенного влияния температуры является изменение физико-химических характеристик органических жидкостей, представляющих собой продукты нефтепереработки сложного состава [23]. Температура среды влияет на энергию границы раздела фаз и смачиваемость минералов в дисперсных системах, на вязкость коллектора и его способность растекаться по поверхности, а также на устойчивость закрепления в турбулентной среде [24, 25].

Для выбора оптимального температурного режима были проведены исследования по обработке алмазосодержащих кимберлитовых продуктов эмульсиями реагентов-модификаторов, в которых в качестве коллекторов применялись нефтепродукты различного фракционного состава.

Эффективность закрепления люминофоров оценивалась по поверхностной концентрации закрепившихся люминофоров, определяемой визиометрическим способом. В отличие от исследований, описанных в работе [17], обработанный алмазо-минеральный продукт после обработки был направлен на процесс рентгенолюминесцентной сепарации, проведенный в сепараторе «Полус-М». Результаты прове-

Таблица 3

Влияние реагентов-диспергаторов на поверхностную концентрацию и селективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита

№	Реагент-диспергатор	Поверхностная концентрация люминофора на алмазе С _{ЛА} , %		Поверхностная концентрация люминофора на кимберлите С _{ЛК} , %		Селективность закрепления СЗЛ _{АК} , доли ед.	
		При концентрации реагента, г/л					
		0	1,5	0	1,5	0	1,5
1	Триполифосфат	38	21,8	7,5	1,5	0,03	0,95
2	Гексаметафосфат	39,3	23,5	7	1,6	0,29	1,03
3	ОЭДФ	38,3	25,5	7,1	1,9	0,19	1,07
4	Кукурузный крахмал	38	20,4	6,9	2,2	0,23	0,63
5	КМЦ	37,4	18,5	6,7	1,8	0,26	0,63
6	Сульфонол	37,8	19,5	7,1	1,8	0,15	0,70
7	Метасиликат натрия	39,4	22,5	7,9	2,1	-0,01	0,80
8	Лигносульфонат	38,9	20,3	7,6	2,2	0,06	0,62

Таблица 4

Результаты визиометрического анализа влияния температурного режима на эффективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита

№	Состав органического коллектора	Температура, °C					
		20	25	30	35	40	45
		Покрывание поверхности алмаза люминофором, %					
3	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	17,4	28,4	33	34,1	36,2	35,7
		Покрывание поверхности кимберлита люминофором, %					
6	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	2,4	2,6	2,8	2,9	3,2	3,5
		Селективность закрепления, усл. ед.					
9	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	0,43	1,03	1,27	1,31	1,35	1,21
		Извлечение алмазов, %					
12	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	80	85	90	95	95	95
		Выход кимберлита, %					
15	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	1,0	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3

Примечания: ТГКК – тяжелый газойль каталитического крекинга; ДТФ – дизельная техническая фракция.



денных исследований подтвердили, что увеличение температуры с 15 до 40 °С усиливает закрепление люминофора на алмазах и кимберлите для всех составов органического коллектора (табл. 4). Результаты исследований показали, что при повышении температуры среды более 40 °С эффективность закрепления люминофора на алмазах незначительно снижается.

Анализ данных расчета селективности закрепления люминофора показывает, что максимальная селективность закрепления люминофора на алмазе и кимберлите наблюдается при температуре обработки от 30 до 45 °С. Анализ результатов рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего кимберлитового продукта подтвердил данные визиометрического анализа и показал возможность максимального извлечения алмазов в диапазоне температур от 30 до 45 °С (см. табл. 4) без существенного увеличения выхода кимберлита. Полученные результаты позволили рекомендовать проводить процесс обработки алмазосодержащих продуктов при повышенной температуре.

4. Выбор компонентного состава эмульсии реагентов-модификаторов спектрально-кинетических характеристик алмазов

Базовыми технологическими параметрами режимов селективного модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов являются следующие характеристики реагента-модификатора: соотношение люминофор – коллектор; соотношение коллектор – водная фаза и концентрация реагента-диспергатора. Учитывая возможность наличия взаимного влияния факторов и необходимость поиска области экстремума для определения оптимального состава реагента-модификатора, был применен метод факторного эксперимента второго порядка. Исходная матрица ПФЭ (ортогональный центрально-композиционный план второго порядка) составлялась по стандартной методике с дополнением нулевой и звездных точек [26]. Экспериментальный массив составил 15 опытов.

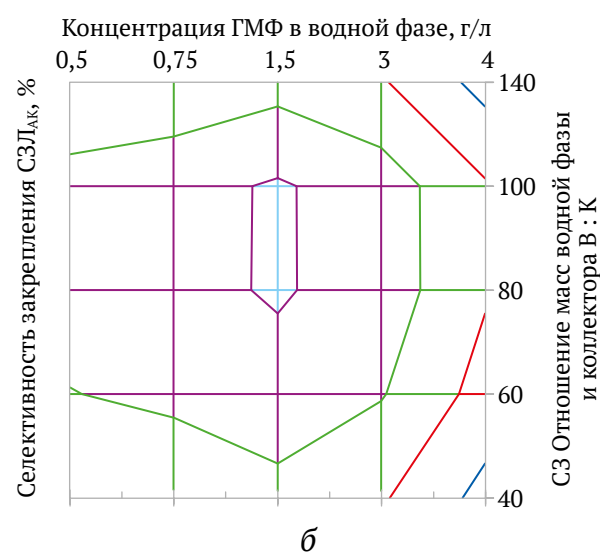
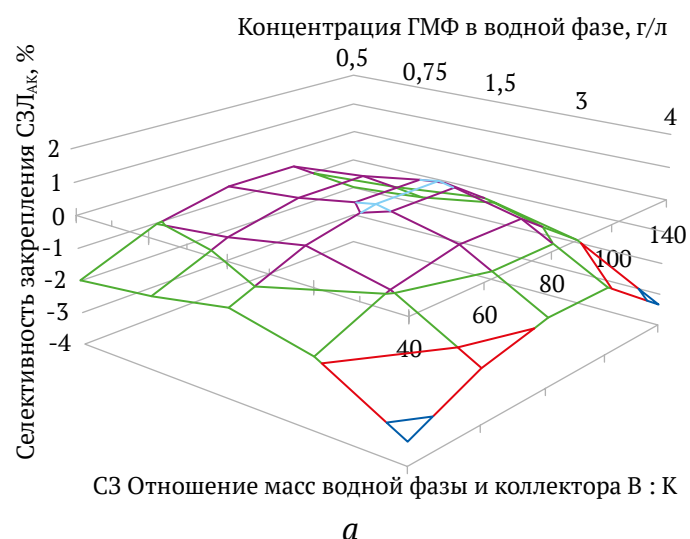
Результаты математической обработки результатов эксперимента, проведенные в среде Excel, позволили определить область оптимальных соотношений между компонентами реагента модификатора МЛА-3 в рабочей эмульсии. Для соотношения вода : коллектор выбрано соотношение 90 : 1. Оптимальная концентрация ГМФ – 1,5 г/л (рис. 7). Оптимальное значение соотношения коллектор : люминофор – 9 : 1. Выбранные параметры близки к значениям, которые были выбраны по результатам лабораторных исследований и использовались как координаты центра матрицы (10 : 1, 60 : 1 и 1,5 г/л).

Результаты показали, что применение водной эмульсии реагентов-модификаторов МЛА-1 на основе люминофора ФЛ-530-Г3-Г5 и МЛА-3 на основе люминофора Э-515-115-Г5 с выбранными параметрами компонентного состава эмульсии реагента-модификатора и с применением в качестве реагента-диспергатора гексаметафосфата натрия приводит

к требуемому изменению спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазов (табл. 5).

Результаты испытаний, проведенных на сепараторе «Полюс-М», показали высокую эффективность разработанных реагентов модификаторов и режимов обработки, обеспечивающих возможность извлечения более 80–95 % слабо и аномально светящихся алмазов в концентрат рентгенолюминесцентной сепарации без существенного возрастания выхода в концентрат кимберлита (см. табл. 5).

Таким образом, результатами проведенных исследований подтверждена эффективность выбранной технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу РЛС, определены оптимальные состав реагента-модификатора и параметры процесса обработки алмазосодержащих кимберлитовых продуктов.



□ 4--3 □ 3--2 □ 2--1 □ 1-0 □ 0-1 □ 1-2

Рис. 7. 3D-графики (а) и сечения (б) зависимостей селективности закрепления люминофора ($C3L_{AK}$) от соотношения масс водной фазы и коллектора (В : К) и концентрации гексаметафосфата (ГМФ)



Таблица 5

**Результаты испытаний реагентов-модификаторов на основе люминофоров
ФЛ-530 (МЛА-1) и Э-515-115 (МЛА-3) на алмазосодержащих кимберлитовых продуктах**

№	Состав композиции	Минерал	Sv	$\tau_{\text{с}}$, мс	$A_{\text{МК}}$, мВ	$A_{\text{БК}} - A_{\text{Б}}$, мВ	K_A	Извлечение, %
1	Без использования люминофоров	Алмаз (сл)	0,15	4,3	120	564	5,7	40
		Алмаз (ан)	–	0,1	Не изм.	1022	≥ 50	20
		Кимберлит	–	–	Не изм.	Менее 50	–	0,75
2	МЛА-1 (ФЛ-530 + ТГКК + ДТФ)	Алмаз (сл)	0,22	1,6	329	1216	4,7	80
		Алмаз (ан)	0,17	0,6	275	1469	6,3	90
		Кимберлит	–	–	Не изм.	Менее 50	–	0,9
3	МЛА-3 (Э-515-115-Г5 + ТГКК + ДТФ)	Алмаз (сл)	0,26	2,3	258	1105	5,0	95
		Алмаз (ан)	0,18	0,5	168	1465	9,9	90
		Кимберлит	–	–	Не изм.	Менее 50	–	0,5
4	Условия селективного режима РЛС	Алмаз	0,1–1	0,1–10	Более 100	–	0,2–12	Извл

Примечания: сл, ан – слабо и аномально люминесцирующие алмазы соответственно, $A_{\text{Б}}$ – амплитуда быстрой компоненты сигнала рентгенолюминесценции воздуха (фон); Не изм. – не измеряется.

Выводы

В результате выполненных исследований определены эффективный состав и режим применения реагентов-модификаторов в технологии подготовки алмазосодержащего материала к процессу рентгенолюминесцентной сепарации.

Установлена возможность целенаправленного модифицирования спектральных характеристик слабо и аномально светящихся алмазов, одновременно присутствующих в алмазосодержащем материале, за счет применения люминофоров на основе ортосиликата цинка и сульфидов цинка (МЛА-1 и МЛА-3), обеспечивающих алмазным кристаллам спектрально-кинетики характеристики, находящиеся в глубине зоны идентификации системы детектирования.

Выбраны состав коллектора кристаллов (85 % ТГКК и 15 % ДТФ) люминофорсодержащей композиции и температурный режим обработки (30–45 °С) алмазосодержащего продукта, обеспечивающих интенсивное и селективное закрепление люминофоров на поверхности алмазных кристаллов.

Результатами математической обработки с использованием критерия селективности закрепления

люминофорсодержащей эмульсии на алмазах и минералах кимберлита, рассчитываемого по величинам измеренных поверхностных концентраций люминофоров на минералах, определены оптимальные соотношения основных компонентов в эмульсии реагента-модификатора, составляющие: вода : коллектор = 90 : 1; коллектор : люминофор = 9 : 1 при концентрации ГМФ – 1,5 г/л.

Выбраны реагенты-диспергаторы (оксиэтилендифосфоновая кислота, гексаметафосфат, метасиликат и триполифосфат натрия), обеспечивающие селективное закрепление люминофоров на алмазах за счет снижения закрепления люминофоров на поверхности зерен кимберлита.

Результатами испытаний, проведенных на сепараторе «Полус-М», подтверждена высокая эффективность реагентов модификаторов разработанного состава и режимов их применения для обработки алмазосодержащего материала, обеспечивающих извлечение в концентрат рентгенолюминесцентной сепарации слабо и аномально светящихся алмазов на уровне 80–95 % без увеличения выхода в него кимберлита.

Список литературы

1. Миронов В.П. Оптическая спектроскопия алмазов из концентратов и хвостов рентгенолюминесцентной сепарации. *Наука и образование*. 2006;(1)31–36.
2. Мартынович Е.Ф., Миронов В.П. Рентгенолюминесценция алмазов и ее использование в алмазодобывающей промышленности. *Известия вузов. Физика*. 2009;52(12/3):202–210.
3. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Морозов В.В. и др. Исследование механизма и выбор режимов селективного закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах. *Физико-технические проблемы переработки полезных ископаемых*. 2020;(1):104–113. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200111> (Перев. вер.: Chanturiya V.A., Dvoichenkova G.P., Morozov V.V. et al. Selective attachment of luminophore-bearing emulsion at diamonds-mechanism analysis and mode selection. *Journal of Mining Science*. 2020;56(1):96–103. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016527>)
4. Морозов В.В., Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Чантурия Е.Л. Анализ гидрофобных взаимодействий в системе «алмаз-органическая жидкость-неорганический люминофор» при модифицировании



спектрально-кинетических характеристик алмазов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(2):94–104. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220209> (Перев. вер.: Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):257–266. <https://doi.org/10.1134/s1062739122020090>)

5. Подкаменный Ю.А., Макалин И.А. Обоснование совокупности спектрально-кинетических параметров рентгенолюминесцентных сепараторов для селективного извлечения алмазных кристаллов. В: *Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плакские чтения – 2021)*. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет); 2021. С. 341–345.

6. Kondratyev S.A. Effect of Apolar Reagents and Surfactants on the Stability of a Flotation Complex *Journal of Mining Science*. 2000;36(4):399–407. <https://doi.org/10.1023/A:1026697811202>

7. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. *Физические методы исследования в химии*. М: Мир; 2003.

8. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. *Цифровая обработка изображений в среде Matlab*. М.: Техносфера; 2006. 616 с. (Orig. ver.: Gonzales R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital image processing using MATLAB*. Prentice Hall; 2004.)

9. Горобец Б.С., Рогожин А.А. *Спектры люминесценции минералов*. М.: Изд-во ВИМС; 2001. 316 с.

10. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*. 2018;13:1521–1538. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>

11. Сепаратор «Полюс-М». Паспорт и инструкция по эксплуатации. СПб.: АО «Буревестник»; 2015. 134 с.

12. Mironov V.P., Emelyanov A.S., Shabalin S.A. et al. X-Ray luminescence in diamonds and its application in industry. In: *Luminescence and Laser Physics: XVII International Conference on Luminescence and Laser Physics – LLPh 2019*. 1–6 July, 2019. Irkutsk, Russia. 2021;2392(1):020010. <https://doi.org/10.1063/5.0061972>

13. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018;35(3):242–251. <https://doi.org/10.3176/oil.2018.3.04>

14. Морозов В.В., Коваленко Е.Г., Двойченкова Г.П., Чуть-Ды В.А. Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями. *Горные науки и технологии*. 2022;7(4):287–297. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>

15. Верхотурова В.А. Елшин И.В., Немаров А.А. и др. Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014;(8):51–56.

16. Авдохин В.М., Чернышева Е.Н. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(S1):465–477.

17. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей*. М.: Мир; 1979. 568 с. (Orig. ver.: Adamson A.W. *Physical chemistry of surfaces*. New York: Wiley; 1976. 698 p.)

18. Srdjan M. Bulatovic, in *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice* i 2007. Elsevier, 458 p. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20230311>

19. Somasundaran P., Zhang L. Adsorption of surfactants on minerals for wettability control in improved oil recovery processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006;52(1–4):198–212. <https://doi.org/10.1016/j.PETROL.2006.03.022>

20. Lee H., Lim H.-K., Kim H. Hydration Thermodynamics of non-polar aromatic hydrocarbons: comparison of implicit and explicit solvation models. *Molecules*. 2018;23(11):2927. <https://doi.org/10.3390/molecules23112927>

21. Афанасова А.В., Абурова В.А., Прохорова Е.О., Лушина Е.А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные порообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–2):161–174. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_161

22. Chmielewská E., Hodossyová R., Kovačková M., Urík M. Comparable phosphate adsorption onto some natural aluminosilicates vs. Fe(III)oxihydroxide. *Desalination and Water Treatment*. 2016;(16):7387–7395. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017008>

23. Туманян Б.П. *Научные и прикладные аспекты теории нефтяных дисперсных систем*. М.: Техника; 2000. 336 с.

24. Полежаева Н.И. *Физико-химия нефтяных дисперсных систем. Термодинамика и кинетика фазовых переходов в нефтяных дисперсных системах*. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева; 2021. 94 с.

25. Земцов Ю.В., Мазаев В.В. *Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи: литературно-патентный обзор*. Екатеринбург: ООО «Издательские решения»; 2021. 240 с.

26. Лунев В.А. *Математическое моделирование и планирование эксперимента*. СПб.: Изд-во Политехнического университета; 2012. 153 с.



References

1. Mironov V.P. Optical spectroscopy of diamonds from concentrates and tailings of X-ray luminescence separation. *Nauka i Obrazovaniye*. 2006;(1)31–36. (In Russ.)
2. Martynovich E.F., Mironov V.P. X-ray luminescence of diamonds and its use in the diamond mining industry. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2009;52(12/3):202–210. (In Russ.)
3. Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Morozov V.V. et al. Selective attachment of luminophore-bearing emulsion at diamonds-mechanism analysis and mode selection. *Journal of Mining Science*. 2020;56(1):96–103. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016527> (Orig. ver.: Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Morozov V.V. et al. Selective attachment of luminophore-bearing emulsion at diamonds-mechanism analysis and mode selection. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Pererabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2020;(1):104–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200111>)
4. Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):257–266. <https://doi.org/10.1134/s1062739122020090> (Orig. ver.: Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Pererabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2022;(2):94–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220209>)
5. Podkamennyi Yu.A., Makalin I.A. Substantiation of the collection of spectral-kinetic parameters of x-ray luminescent separators for selective extraction of diamond crystals. In: *Problems of Integrated and Environmentally Safe Processing of Natural and Technogenic Mineral Raw Materials (Plaksin Readings – 2021)*. Vladikavkaz: North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University); 2021. Pp. 341–345. (In Russ.)
6. Kondratyev S.A. Effect of Apolar Reagents and Surfactants on the Stability of a Flotation Complex *Journal of Mining Science*. 2000;36(4):399–407. <https://doi.org/10.1023/A:1026697811202>
7. Pentin Yu.A., Vilkov L.V. *Physical research methods in chemistry*. Moscow: Mir Publ. House; 2003. (In Russ.)
8. Gonzales R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital image processing using MATLAB*. Prentice Hall; 2004. (Transl. ver.: Gonzales R., Woods R., Eddins S. *Digital image processing using Matlab*. Moscow: Tekhnosfera; 2006. 616 p. (In Russ.))
9. Gorobets B.S., Rogozhin A.A. *Luminescence spectra of minerals*. Moscow: Publishing House of the All-Union Institute of Mineral Raw Materials; 2001. 316 p. (In Russ.)
10. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*. 2018;13:1521–1538. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
11. Separator “Polyus-M”. Passport and operating instructions. Saint Petersburg: JSC “Burevestnik”; 2015.
12. Mironov V.P., Emelyanov A.S., Shabalin S.A. et al. X-Ray luminescence in diamonds and its application in industry. In: *Luminescence and Laser Physics: XVII International Conference on Luminescence and Laser Physics – LLPh 2019*. 1–6 July, 2019. Irkutsk, Russia. 2021;2392(1):020010. <https://doi.org/10.1063/5.0061972>
13. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018;35(3):242–251. <https://doi.org/10.3176/oil.2018.3.04>
14. Morozov V.V., Kovalenko E.G., Dvoichenkova G.P., Chut-Dy V.A. Selection of temperature regimes for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite with compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):287–297. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>
15. Verkhoturova V., Elshin I., Nemarov A., Tolstoy M. et al. Scientific justification and optimum alternative selection to recover hydrophobic properties of diamond surface from “International” tube ore. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;(8):51–56. (In Russ.)
16. Avdokhin V.M., Chernysheva E.N. Modern technologies of diamond-containing kimberlites enrichment. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2010;(S1):465–477.
17. Adamson A.W. *Physical chemistry of surfaces*. New York: Wiley; 1976. 698 p. (Transl. ver.: Adamson A. *Physical chemistry of surfaces*. Moscow: Mir Publ. House; 1979. 568 p. (In Russ.))
18. Srdjan M. Bulatovic, in *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice* i 2007. Elsevier, 458 p. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230311>
19. Somasundaran P., Zhang L. Adsorption of surfactants on minerals for wettability control in improved oil recovery processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006;52(1–4):198–212. <https://doi.org/10.1016/j.PETROL.2006.03.022>
20. Lee H., Lim H.-K., Kim H. Hydration Thermodynamics of non-polar aromatic hydrocarbons: comparison of implicit and explicit solvation models. *Molecules*. 2018;23(11):2927. <https://doi.org/10.3390/molecules23112927>
21. Afanasova A.V., Aburova V.A., Prokhorova E.O., Lushina E.A. Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide gold-bearing ore flotation. *Mining*



Informational and Analytical Bulletin. 2022;(6–2):161–174. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_161

22. Chmielewska E., Hodossyová R., Kovalaková M., Urík M. Comparable phosphate adsorption onto some natural aluminosilicates vs. Fe(III)oxyhydroxide. *Desalination and Water Treatment*. 2016;(16):7387–7395. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017008>

23. Tumanyan B.P. *Scientific and applied aspects of the theory of oil dispersed systems*. Moscow: Technika; 2000. 336 p.

24. Polezhaeva N.I. *Physico-chemistry of petroleum dispersed systems. Thermodynamics and kinetics of phase transitions in petroleum dispersed systems*. Krasnoyarsk: Sibgau named after M.F. Reshetnev; 2021. 94 p. (In Russ.)

25. Zemtsov Yu.V., Mazaev V.V. *The current state of physico-chemical methods of increasing oil recovery: a literary and patent review*. Yekaterinburg: Publishing Solutions LLC; 2021. 240 p. (In Russ.)

26. Lunev V.A. *Mathematical modeling and experimental planning*. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2012. 153 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Валентин Алексеевич Чантурия – доктор технических наук, профессор, академик РАН, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4410-8182](https://orcid.org/0000-0002-4410-8182), Scopus ID [7004497128](https://orcid.org/7004497128); e-mail vchan@mail.ru

Валерий Валентинович Морозов – доктор технических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://orcid.org/7402759618)

Галина Петровна Двойченкова – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3637-7929](https://orcid.org/0000-0003-3637-7929), Scopus ID [8837172700](https://orcid.org/8837172700); e-mail dvoigr@mail.ru

Юрий Александрович Подкаменный – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4104-9113](https://orcid.org/0000-0002-4104-9113), Scopus ID [57209793744](https://orcid.org/57209793744)

Александр Сергеевич Тимофеев – старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3382-6007](https://orcid.org/0000-0002-3382-6007), Scopus ID [57191282007](https://orcid.org/57191282007)

Information about the authors

Valentin A. Chanturiya – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4410-8182](https://orcid.org/0000-0002-4410-8182), Scopus ID [7004497128](https://orcid.org/7004497128); e-mail vchan@mail.ru

Valeriy V. Morozov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://orcid.org/7402759618)

Galina P. Dvoichenkova – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3637-7929](https://orcid.org/0000-0003-3637-7929), Scopus ID [8837172700](https://orcid.org/8837172700); e-mail dvoigr@mail.ru

Yuri A. Podkamennyi – Dr. Sci. (Eng.), Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4104-9113](https://orcid.org/0000-0002-4104-9113), Scopus ID [57209793744](https://orcid.org/57209793744)

Aleksandr S. Timofeev – Leading Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3382-6007](https://orcid.org/0000-0002-3382-6007), Scopus ID [57191282007](https://orcid.org/57191282007)

Поступила в редакцию 06.09.2023
Поступила после рецензирования 16.09.2023
Принята к публикации 10.10.2023

Received 06.09.2023
Revised 16.09.2023
Accepted 10.10.2023