

ГЛУБОКАЯ ПЕРЕРАБОТКА АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В.А. Чантурия, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Россия

Г.П. Двойченкова, ИПКОН РАН, г. Москва, Россия; Мирнинский Политехнический институт филиал Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова (МПТИ (ф) СВФУ), г. Мирный, Россия

Е.Л. Чантурия, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (ННТУ МИСИС), г. Москва, Россия

А.С. Тимофеев, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Россия

Аннотация: На основе комплексных экспериментальных исследований отдельных переделов современной технологии глубокой переработки кимберлитового сырья коренного и техногенного происхождения месторождений Западной Якутии подтверждена технологическая эффективность разработанных технических решений, обеспечивающих возможность получения качественных конечных концентратов широкого класса крупности за счет:

- ✧ снижения скорости коррозии ферросилиция в 2,7 раза методом азотирования его поверхности в установленных оптимальных режимах;
- ✧ повышения качества черновых концентратов тяжелосредней сепарации за счет реализации двухстадийной магнитной сепарации, обеспечивающей выделение из них железосодержащих минералов;
- ✧ извлечения слабо- и аномально люминесцирующих алмазов в цикле рентгенолюминесцентной сепарации вследствие корректировки их спектрально-кинетических характеристик с применением люминофорсодержащих реагентов разработанного состава;
- ✧ повышения извлечения алмазов класса -6 мм в циклах липкостной и пенной сепараций, а также доводочных операций РЛС за счет модифицирования свойств поверхности извлекаемых алмазных кристаллов.

Ключевые слова: алмазы, минералы, ферросилиций, суспензия, магнитная сепарация, доводка, модифицирование, технологические свойства, извлечение, эмульсия.

DEEP PROCESSING OF DIAMOND-CONTAINING RAW MATERIALS OF NATURAL AND MAN-MADE ORIGIN

V.A. Chanturia, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russia

G.P. Dvoichenkova, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russia; North-Eastern Federal University, Mirny, Russia

E.L. Chanturia, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

A.S. Timofeev, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russia

Abstract: The results of experimental approbation of individual cycles of modern technology for deep processing of kimberlite raw materials of indigenous and technogenic origin from deposits in Western Yakutia confirmed the technological efficiency of the developed technical solutions that provide the possibility of obtaining high-quality final concentrates of a wide size class due to:

- ✧ reducing the corrosion rate of ferrosilicon by 2.7 times by nitriding its surface in the established optimal modes;
- ✧ improving the quality of rough concentrates of dense medium separation by extracting iron-containing minerals from them using two-stage magnetic separation;
- ✧ extraction of weakly and abnormally luminescent diamonds in the X-ray luminescent separation cycle due to the correction of their spectral and kinetic characteristics using luminophor-containing reagents of the developed composition;
- ✧ increasing the extraction of diamonds of the -6mm class in the cycles of sticky, foam separations and finishing operations of the radar due to the modification of the surface properties of the extracted diamond crystals in accordance with the requirements of the considered technological processes.

Keywords: diamonds, minerals, ferrosilicon, suspension, magnetic separation, conditioning, modification, technological properties, extraction, emulsion.

В современных условиях с учетом снижения разведанных запасов алмазосодержащих месторождений для достижения необходимой эффективности глубокого обогащения текущего алмазосодержащего сырья требуется обеспечение полноты и комплексности его использования при максимальном уровне извлечения алмазных кристаллов [1-4].

Современные комбинированные схемы переработки алмазосодержащего сырья включают определенную последовательность технологических операций, приведенных ниже на рис. 1 и учитывающих как вещественный состав исходного алмазосодержащего материала, так и технологические

особенности циклов основного обогащения и циклов доводки черновых концентратов [5, 6]:

1. Для первичного выделения алмазов в современных схемах переработки алмазосодержащего материала применяется процесс тяжелосредной сепарации (ТСС), эффективность и экономические показатели которой зависят от стабильности и устойчивости технологических свойств ферросилиция и ферросилициевой суспензии.

2. Черновой концентрат тяжелосредной сепарации поступает в 1-ый цикл доводки с применением мокрой рентгенолюминесцентной сепарации (РЛС), липкостной сепарации (ЛС) и пенной сепарации (ПС), эффективность которых

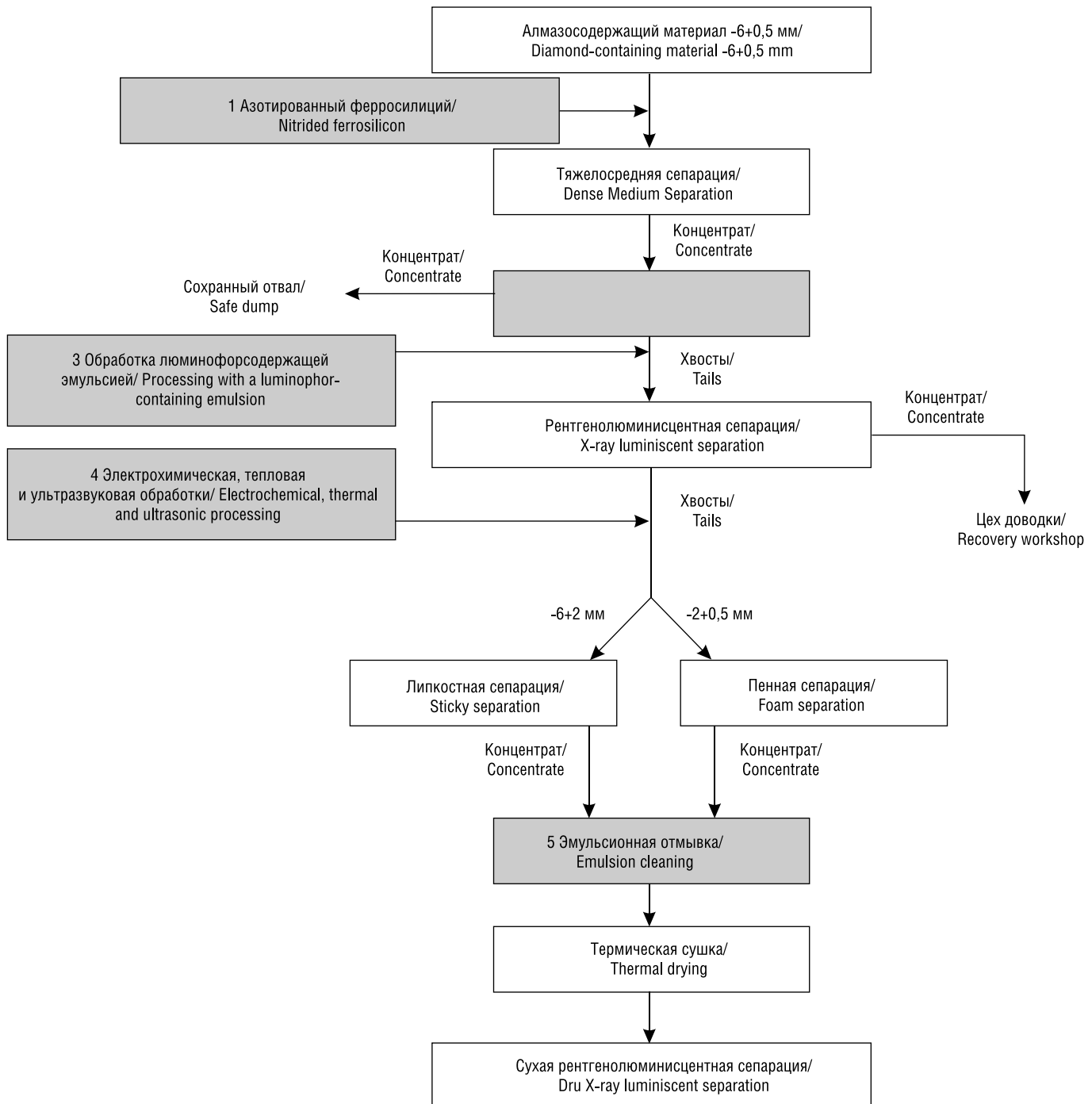


Рис. 1. Схема применения методов интенсификации процессов для достижения глубокого обогащения алмазосодержащего материала природного и техногенного происхождения / Fig. 1. Scheme of application of methods for intensifying the processes of achieving deep enrichment of diamond-bearing material of natural and technogenic origin.

обусловлена соответственно контрастностью природных значений интенсивности люминесценции и степени гидрофобности поверхности разделяемых минералов.

3. Черновые концентраты основных липкостной и пенной сепараций поступают во 2-ой цикл доводки методом сухой РЛС, эффективность которой обусловлена чистотой отмытки рудного материала и алмазных кристаллов от органических остатков жировой мази и мазута перед процессом термической сушки.

Каждый из вышеприведенных технологических циклов предъявляет свои требования к условиям эффективной его реализации, что обуславливает необходимость разработки схемы последовательного применения и экспериментальной апробации методов достижения глубокого обогащения алмазосодержащего материала, реализация которых позволит получить соответствующие концентраты высокого качества при максимальной степени извлечения в них алмазных кристаллов.

Задача настоящих исследований заключалась в экспериментальном обосновании последовательности применения комбинированных физических, химических, физико-химических и энергетических методов модифицирования свойств рудной пульпы, алмазных кристаллов и ферросилиция в современных схемах переработки алмазосодержащего материала природного и техногенного происхождения для достижения максимальной глубины его обогащения с использованием рентгенолюминесцентной, липкостной, пенной и тяжелосредной сепараций.

Материалы и методы исследования

В качестве предметов исследований изучены компоненты ферросилициевой суспензии и рудной пульпы, продукты обогащения процессов ТСС, РЛС, ЛС и ПС интенсивно измененных кимберлитовых руд природного и техногенного происхождения, а также параметры химических, физических, физико-химических и энергетических методов модифицирования технологических свойств разделяющих сред и разделяемых минералов в рассматриваемых условиях.

Методы исследований, использованные в экспериментах: ИК-спектрофотометрия, электронно-микроскопические и рентгенометрические исследования поверхности кристаллов, методы минерального и фракционного анализов проб кимберлита, химические анализы состава водных систем. Проведены лабораторные испытания предложенных технических решений по реализации методов интенсификации процессов глубокой переработки алмазосодержащего материала с использованием математической обработки конечных результатов.

Исследования алмазосодержащего материала выполнены в лабораториях институтов НИГП и «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» при непосредственном участии Подкаменного Ю.А., Ковальчука О.Е., Коваленко Е.Г., Островской Г.Х.

Экспериментальные исследования проведены поэтапно в соответствии со схемой (рис. 1), согласно которой апробирована последовательность химических, физических, физико-химических и энергетических воздействий на состав геоматериалов и водные суспензии в принятой на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» современной технологии глубокого обогащения алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения.

В соответствии с предложенным алгоритмом экспериментальная оценка эффективности методов интенсификации процессов для обеспечения глубокого обогащения алмазосодержащего материала выполнена в пяти последовательных точках технологической схемы, указанных на рис. 1 и описанных ниже.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментальная апробация новых технических решений для достижения глубокой переработки алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения выполнена с учетом новых научных знаний и рекомендаций, разработанных в предыдущих исследованиях под руководством академика РАН Чантурия В.А [7]:

1. *Обеспечение эффективности процесса ТСС за счет снижения потерь ферросилиция вследствие азотирования поверхности ферросилициевых гранул, обеспечивающего повышение его коррозионной устойчивости.*

Экономические показатели процесса тяжелосредной сепарации также во многом обусловлены коррозионной устойчивостью ферросилиция, применяемого в качестве утяжелителя для приготовления тяжелосредной суспензии [8-11].

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили научно обосновать и разработать способ подготовки гранулированного ферросилиция к использованию в процессе тяжелосредной сепарации, включающий азотирование ферросилициевых гранул по технологии, обеспечивающей образование на их поверхности нитридной оболочки, обеспечивающей устойчивость ферросилиция вследствие снижения до 50 % скорости его окисления при взаимодействии с минерализованными водными системами технологического цикла.

Установлены режимы азотирования гранул ферросилиция, создающие оптимальную толщину поверхностного азотированного слоя, обеспечивающего максимальную коррозионную устойчивость ферросилиция при сохранении исходных технологических свойств.

В качестве контролируемых технологических параметров азотированного слоя изучены: изменение намагниченности (коррозионная устойчивость), устойчивость к истиранию и глубина проникновения от поверхности гранулы, оптимальное значение которой достигается в режиме азотирования: температура 1000 °С, время выдержки 2 часа, давление азота 1,25 атмосфер (режим 4, табл. 1), составляет 30-60 нм и обеспечивает снижение скорости коррозии ферросилициевых гранул в 2,7 раза (с 51,24 до 19,07 %) с повышением степени устойчивости к истиранию на 7,2 % (рис. 2).

По результатам математической обработки полученных данных установлена возможность продления срока полезного использования азотированного ферросилиция примерно в 2 раза.

2. *Повышение качества чернового концентрата ТСС перед процессами его доводки за счет снижения выхода кимберлитового материала вследствие извлечения из него железосодержащих минералов, введением метода межциклового операции магнитной сепарации.*

Доводка черновых продуктов основного процесса ТСС обеспечивает необходимую глубину обогащения алмазосодержащего материала за счет получения высококачественных конечных алмазосодержащих концентратов широкого

Таблица 1 / Table 1

Режимы азотирования ферросилиция / Ferrosilicon nitriding modes.

Режим обработки / Processing mode	Температура / Temperature, °C	Время азотирования, час. / Nitriding time, hour	Давление азота в камере, атм. / Nitrogen pressure in the chamber, atm.
Исходный / original	-	-	-
1	1100	3	1,25
2	900	3	1,25
3	1000	1	1,25
4	1000	2	1,25
5	1000	3	1,25
6	1000	1	1

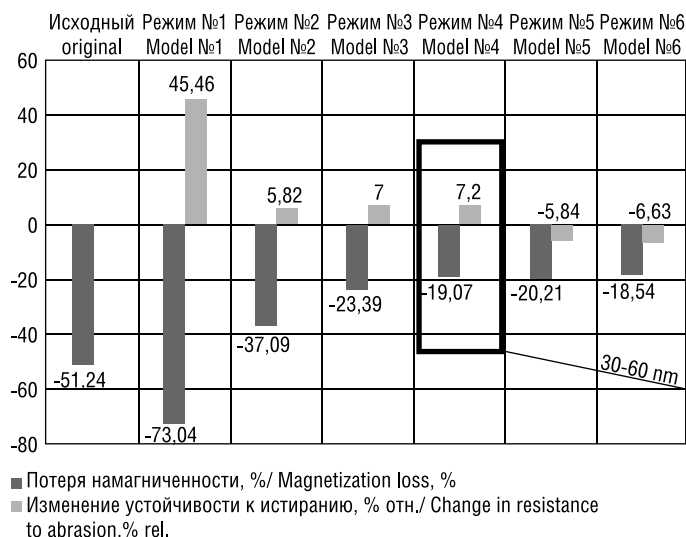


Рис. 2. Влияние режимов азотирования на технологические свойства ферросилиция /

Fig. 2. Influence of nitriding regimes on the technological properties of ferrosilicon.

класса крупности. Технологическая схема цеха доводки включает процессы РЛС, ЛС и ПС, принимающие различные объёмы черновых концентратов, в которых содержатся алмазосодержащее сырье рудных фракций с высоким содержанием тяжелых минералов, в том числе железосодержащих как сильно-, так и слабомагнитных.

Ранее выполненные экспериментальные исследования позволили установить возможность сокращения на 95,8% выхода концентрата основного процесса ТСС алмазосодержащего материала с высоким содержанием сидерита (до 82,22 %) за счет применения в схеме магнитной сепара-

ции, включающей последовательное выделение сильномагнитных минералов в слабых (до 2000 Э) и слабомагнитных в сильных (до 14000 Э) магнитных полях [12].

Для подтверждения применимости разработанного метода к использованию в схеме доводки близкого по составу алмазосодержащего материала с более низкими содержаниями тяжелых железосодержащих минералов выполнены аналогичные исследования на пробе кимберлитового сырья россыпного месторождения, минеральный состав которого представлен в табл. 2.

Из представленных данных следует, что тяжелая фракция

исследуемой пробы кимберлитового минерала характеризуется достаточно высоким содержанием как слабомагнитного минерала – сидерита (15,65 %) в присутствии сильномагнитного минерала – магнетита (0,04 %), так и немагнитных минералов, представленных пиритом (16,61 %).

С учетом приведенных данных минерального анализа и результатов ранее выполненных исследований проведена экспериментальная апробация разработанного метода применения двухстадийной магнитной сепарации для выделения железосодержащих минералов из объема исследуемой пробы кимберлитового материала.

Таблица 2 / Table 2

Содержание основных диагностированных минералов (%) в исследуемой пробе кимберлитового материала / The content of the main diagnosed minerals (%) in the studied sample of kimberlite material.

Плотность минералов, г/см³ Density of minerals, g/cm³	Легкая фракция / Light fraction					Тяжелая фракция / Heavy fraction			Прочие / Other	Итого / Total
	2,2-2,4	2,6-2,65	2,71	2,76	2,84	3,96	5	5,0-5,2		
Класс крупности / Size grade	Гипс / Gypsum	Кварц / Quartz	Кальцит / Calcite	Анортит / Anorthite	Доломит / Dolomite	Сидерит / Siderite	Пирит / Pyrite	Магнетит / Magnetite		
-6+3 mm	0,98	49,05	3,59	3,28	6,49	11,50	20,28	0,04	5,77	100,00
-3+1 mm	1,55	41,58	3,54	0,53	7,61	19,99	12,77	0,04	13,94	100,00
-6+1 mm	1,26	45,40	3,56	1,93	7,04	15,65	16,61	0,04	9,77	100,00

На основе анализа минерального состава продуктов магнитной сепарации подтверждена высокая степень извлечения сильно- и слабомагнитных железосодержащих минералов в концентрат и высокая степень содержания немагнитных минералов в хвостах последовательного применения слабомагнитных (до 2000 Э) и сильномагнитных (до 14000 Э) сепараторов.

Приведенные на рис. 3 данные показывают, что применение межцикловой магнитной сепарации позволит за счет удаления сидерита и магнетита сократить выход концентрата ТСС исследуемой пробы крупностью -6+1 мм на 29,53 %, что подтверждает применимость разработанного технического решения в схемах переработки алмазосодержащего сырья аналогичного состава, характеризующегося присутствием железосодержащих минералов.

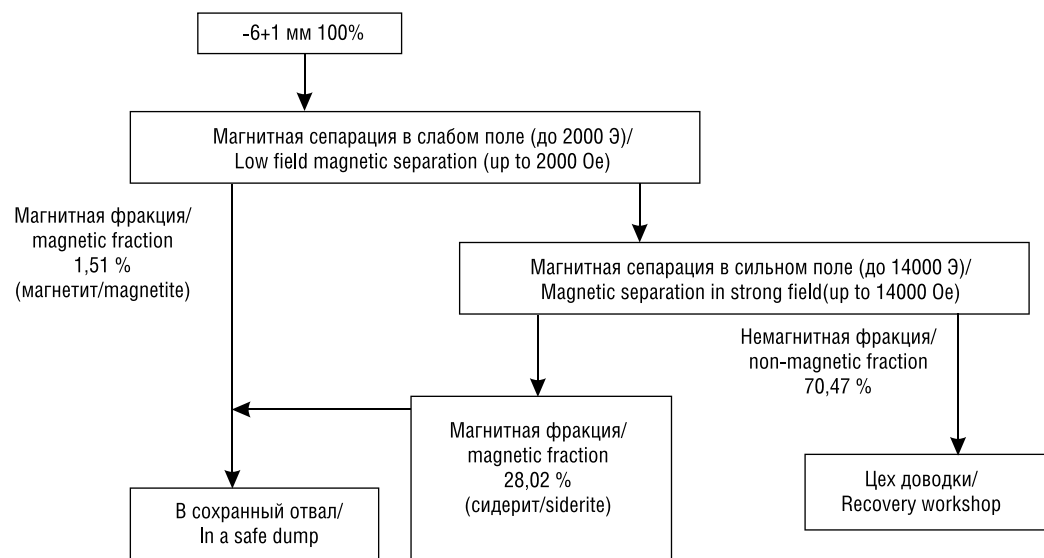


Рис. 3. Экспериментальная схема двухстадийной магнитной сепарации кимберлитового материала /

Fig. 3. Experimental scheme of two-stage magnetic separation of kimberlite material.

3. Повышение извлечения алмазов в цикле РЛС за счет извлечения из хвостов основной операции слабо и аномально люминесцирующих кристаллов вследствие модифицирования их природных спектрально-кинетических характеристик ме-

тодом обработки алмазосодержащего материала люминофорсодержащими реагентами разработанного состава.

Согласно данным НИГП АК «АЛРОСА» определенный класс алмазных кристаллов не извлекается в условиях рентгенолюминесцентной сепарации, что обусловлено отклонением их природных спектрально-кинетических характеристик от значений параметров настройки действующих сепараторов [13-15].

В ИПКОН РАН разработаны состав, способ приготовления и применения люминофорсодержащих реагентов, позволяющие модифицировать спектрально-кинетические характеристики слабо- и аномально люминесцирующих алмазов до значений, обеспечивающих их эффективное извлечение в концентрат действующих схем РЛС [16, 17].

В настоящих исследованиях с применением люминесцентной микроскопии на коллекциях алмазов различных месторождений как природного, так и техногенного происхождения апробировано влияние разработанного компонентного состава реагентов-модификаторов на интенсивность люминесценции кристаллов. Показано, что закрепившийся на алмазных кристаллах люминофор усиливает сигнал люминесценции кристаллов и корректирует его спектрально-кинетические характеристики до значений, позволяющих эффективное диа-

гностирование и извлечение в рентгенолюминесцентных сепараторах слабо- и аномально люминесцирующих алмазов. На фото (рис. 4) приведен пример корректировки спектрально-кинетических характеристик нелюминесци-

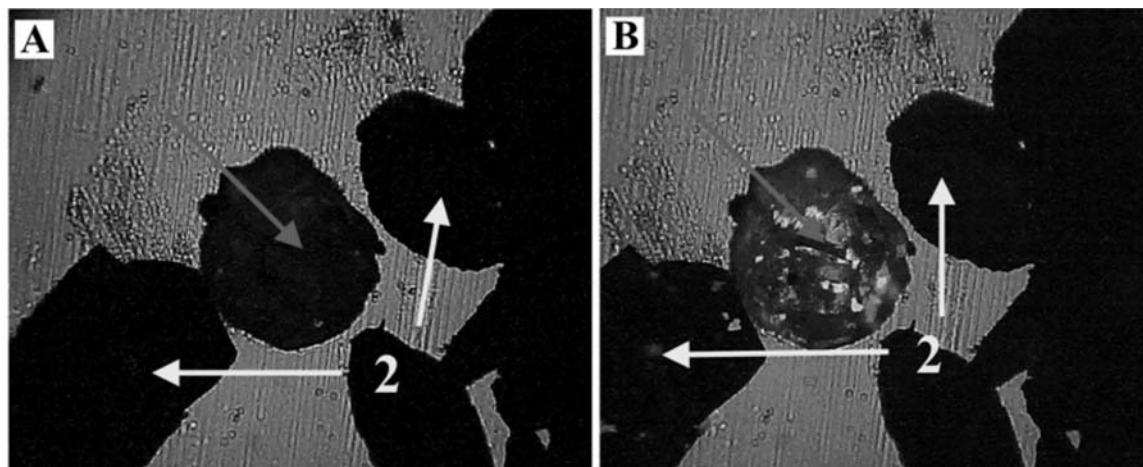


Рис. 4. Изображения кристалла алмаза (1) и зерен кимберлита (2) обработанных люминофорсодержащим реагентом при дневном (А) и УФ освещении (В) /

Fig. 4. Images of a diamond crystal (1) and kimberlite grains (2) treated with a phosphor-containing reagent under daylight (A) and UV illumination (B).

рущего алмазного кристалла обработкой его в смеси с кимберлитовыми зёрнами люминофорсодержащей эмульсией установленного компонентного состава. В УФ-освещении отчетливо видно усиление сигнала люминесценции алмаза при его практически полном отсутствии на минералах кимберлита.

Установлена высокая эффективность замены используемого в предыдущих исследованиях органического коллектора — дизельного топлива — на коллектор, состоящий из тяжелого газойля каталитического крекинга (ТГКК) и дизельной технической фракции (ДТФ).

Результаты визиометрического анализа проб, обработанных реагентами — модификаторами, показали высокую эффективность применения неорганического люминофора ФЛ-530Г и органического люминофора — антрацена, загруженных в органический коллектор нового состава, состоящий из тяжелого газойля каталитического крекинга (ТГКК) и дизельной технической фракции.

Максимальное повышение интенсивности люминесценции кристаллов алмазов в принятых условиях достигается при концентрации люминофорсодержащей композиции в эмульсии 1-2 % и при использовании реагентов диспергаторов типа полифосфата натрия, обеспечивающих необходимую устойчивость эмульсии и необходимую селективность закрепления люминофорсодержащей композиции на алмазах.

Результаты экспериментальной оценки эффективности выбранного состава люминофорсодержащих реагентов для модифицирования значений спектрально-кинетических характеристик слабо- и аномально люминесцирующих кристаллов алмазосодержащих месторождений различного происхождения с использованием опытного рентгенолюминесцентного сепаратора «Полюс-М» показали, что их применение обеспечивает полное извлечения ранее

не извлекаемых алмазов при допустимом выходе кимберлита не более 2,5 % (табл. 3).

4. Повышение извлечения алмазов класса -6 мм за счет применения разработанной технологии совмещения ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий на рудную пульпу перед процессами ЛС и ПС, обеспечивающей восстановление гидрофобных свойств поверхности алмазных кристаллов вследствие удаления с нее гидрофилизирующих образований определенного строения.

Для подтверждения универсальности технологии гидрофобизации алмазных кристаллов, разработанной в ИПКОН РАН для алмазов месторождений Мирнинского рудного поля, выполнены аналогичные эксперименты по ее апробации на кимберлитовом материале и алмазных кристаллах -6+0,5 мм, извлеченных из продуктов переработки различных алмазосодержащих месторождений Западной Якутии природного и техногенного происхождения [18, 19].

В экспериментах использована коллекция алмазов, отдельные кристаллы которой приведены на рис. 5. Поверхность отобранных для исследований кристаллов содержала три типа гидрофилизирующих образований, диагностированных в ранее проведенных экспериментах, представленных шламовыми покрытиями различной площади, массивными рельефными образованиями, и комбинированными минеральными образованиями.

С учетом имеющихся данных о методах их деструкции и удаления в отдельных операциях ЛС и ПС в настоящих исследованиях изучено комплексное применение ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий на общую массу исследуемых кристаллов перед последующим их разделением по крупности для извлечения липкостной (-6+2 мм) и пенной (-2+0,5 мм) сепарациями.

На рис. 6 представлены примеры очистки поверхности гидрофильных алмазных кристаллов исследуемой коллекции за счет применения разработанной технологии совмещения ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий в условиях обработки общей массы алмазных кристаллов -6 мм.

Степень очистки поверхности кристаллов от гидрофилизирующих минеральных образований силикатного и карбонатного состава составила в среднем от 92 до 95 %, что также подтверждается увеличением краевого угла смачиваемости в среднем от 48,6 град. (без обработки) до 86,4 град. (после обработки).

Стандовые испытания (табл. 4) подтвердили эффективность применения комплексных ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий на алмазосодержащий материал (-6+0,5 мм), обеспечивающих гидрофобизацию поверхности алмазных кристаллов за счет очистки от гидрофилизирующих образований перед последующим извлечением методами липкостной (-6+2 мм) и пенной (-2+0,5 мм) сепарациями. Прирост извлечения алмазов в стендовых испытаниях, выполненных согласно схеме рис. 1 (операция 4), составил в концентраты липкостной и пенной сепараций 14 и 12,7 % соответственно.

5. Повышение извлечения алмазов в цикле доводки концентратов ЛС и ПС методом сухой РЛС за счет интенсификации процесса их отмытки от жировой мази и мазута перед процессом термической сушки вследствие применения разработанной водоземulsionной технологии.

Таблица 3 / Table 3

Состав и свойства люминофорсодержащих композиций для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов / Composition and properties of luminophore-containing compositions for modifying the spectral-kinetic characteristics of diamonds.

Люминофорсодержащая композиция / Luminophore-containing composition	Тип люминофора в композиции / Type of luminophore in the composition	Состав органического коллектора / Organic collector composition	Массовая доля люминофора в композиции, % / Mass fraction of the luminophore in the composition, %	Извлечение на сепараторе «Полюс-М», % / Extraction on the separator «Polus-M», %	
				алмазов / diamonds	кимберлита / kimberlite
Без обработки / No processing	-	-	-	20,0	1,7
МЛА-1 / MLA-1	ФЛ-530Г / FL-530G	ТГКК и ДТФ / TGCC and DTF TGCC 80-90%	1-2	100,0	2,5
МЛА-2 / MLA-2	ФЛ-530Г и антрацен / FL-530G and anthracene (25-40):1	ДТФ / DTF	1-2	100,0	2,3

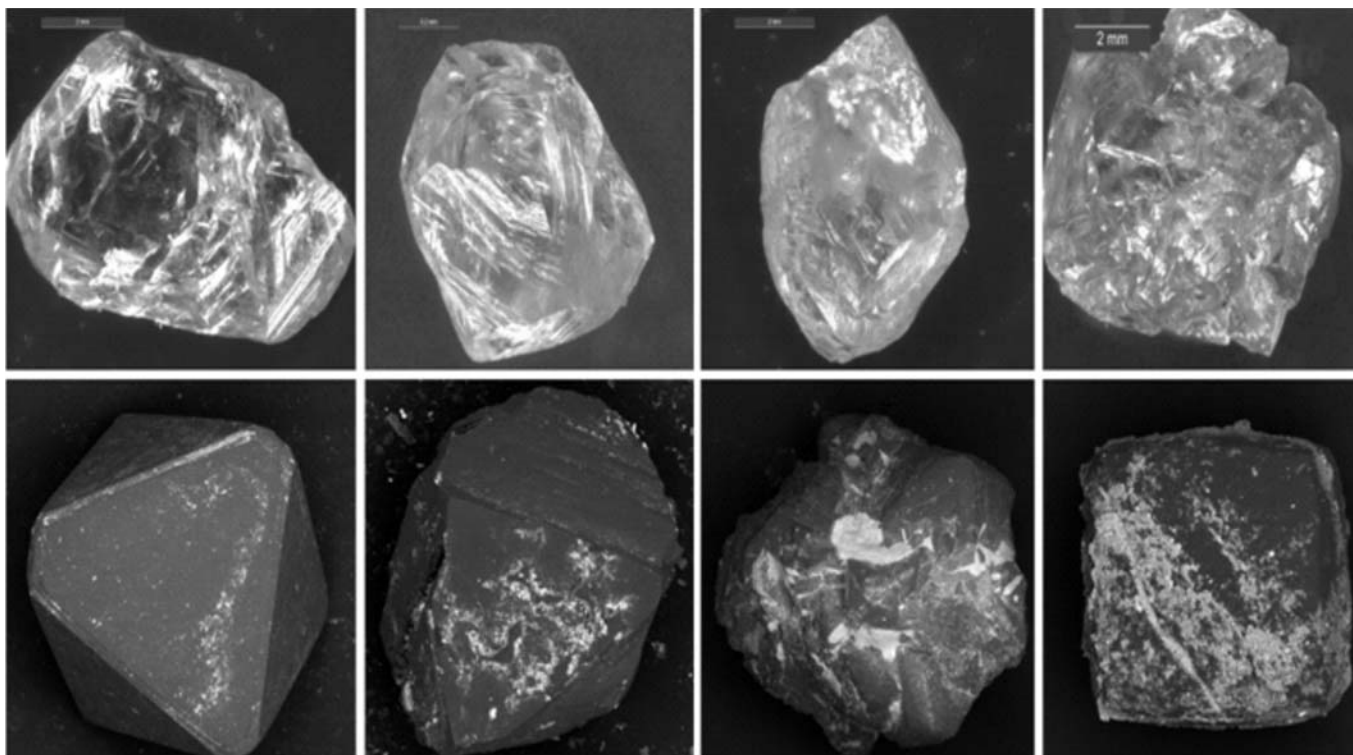


Рис. 5. Внешний вид алмазов из общей коллекции и электронные изображения гидрофилизирующих образований на их поверхности /
Fig. 5. Appearance of diamonds from the general collection and electronic images of hydrophilizing formations on their surface.

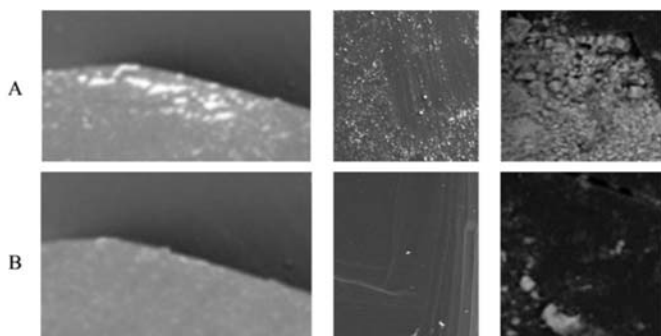


Рис. 6. Внешний вид поверхности алмазных кристаллов -6 мм до (А) и после (В) комплексной обработки методами гидрофобизации их поверхности / Fig. 6. Appearance of the surface of diamond crystals -6 mm before (A) and after (B) complex treatment by methods of hydrophobization of their surface.

Технология глубокого обогащения алмазосодержащего сырья включает схему доводки концентратов крупностью -6 мм методом сухой рентгенолюминесцентной сепарации. Для реализации данной технологии необходимо реализовать отмывку концентратов от остатков органических реагентов: жировой мази, используемой в ЛС, и мазута, используемого в ПС, горячей водой (~90°) с кальцинированной содой и последующую высокотемпературную (350-400°) сушку [20].

Исследования институтов ИПКОН РАН, НИГП и «Якут-нипроалмаз» АК «АЛРОСА», выполненные ранее на продуктах обогащения алмазосодержащих кимберлитов трубки Интернациональная, позволили установить низкую эффективность отмывки алмазных кристаллов по существующей технологии. Экспериментально установлено, что в условиях

Таблица 3 / Table 3
Результаты стендовых испытаний липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего материала / Bench test results of sticky and foam separation of diamond-bearing material.

№	Условия технологической операции / Conditions of the technological operation	Извлечение алмазов / Diamond recovery, %	Прирост извлечения / Extraction gain, %
1	Пенная сепарация (стандартный режим) / Foam separation (standard mode)	84,0	-
2	Пенная сепарация после комбинированной обработки / Foam separation after combined processing	96,7	12,7
3	Липкостная сепарация (стандартный режим) / Sticky separation (standard mode)	81,7	-
4	Липкостная сепарация после комбинированной обработки / Sticky separation after combined processing	95,7	14,0

высокотемпературной сушки на поверхности алмазных кристаллов образуются непрозрачные пленки не сгоревших остатков органических реагентов, снижающих интенсивность люминесценции алмазов и, соответственно, их извлечение в концентраты доводочных операций РЛС (рис. 7).

Для решения поставленной проблемы в ИПКОН РАН создан эффективный эмульсионный реагент на основе дизельного топлива (ЭДТ-100), научно обоснованная композиция которого состоит из углеводородных компонентов и ПАВ в определенном соотношении. Промышленными испытаниями данной технологии в условиях переработки кимберлитов Мирнинского рудного поля установлена

возможность повышения извлечения алмазов класса -5 мм в 3,3 раза.



Рис. 7. Алмазные кристаллы, извлеченные из хвостов доводочных операций РЛС. / Fig. 7. Diamond crystals extracted from the tailings of finishing operations of X-ray luminescent separation.

Для подтверждения универсальности разработанной технологии отмывки алмазосодержащих концентратов перед процессами их доводки выполнены аналогичные эксперименты по ее апробации на кимберлитовом материале и алмазных кристаллах крупностью $-6+0,5$ мм, извлеченных из продуктов переработки различных алмазосодержащих месторождений Западной Якутии природного и техногенного происхождения.

На рис. 8 представлены фотографии алмазосодержащих концентратов, отмытых перед высокотемпературной сушкой по двум вариантам: с использованием стандартной технологии и с использованием эмульсионного метода, а также извлеченные из них алмазные кристаллы.

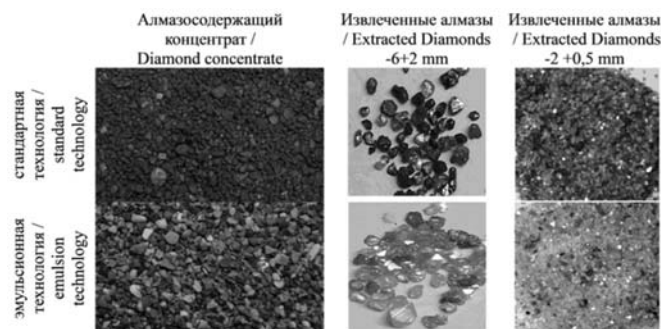


Рис. 8. Фотографии алмазосодержащих концентратов и извлеченных из них алмазов. / Fig. 8. Photographs of diamond-bearing concentrates and diamonds extracted from them.

На представленных фотографиях отчетливо видно, что в первом варианте извлеченные алмазы покрыты непрозрачной черной пленкой, а во втором варианте кристаллы совершенно прозрачные с чистой поверхностью.

Опробование рентгенолюминесцентных сепараторов в период сравнительной опытной апробации базовой (фаб-

ричной) и разработанной технологии отмывки алмазосодержащих концентратов перед процессом их высокотемпературной сушки подтвердило эффективность последней, в условиях применения которой общий прирост извлечения алмазов класса -6 мм составил в среднем 25,8 % (с 73,9 до 99,2 %). В среднем за период испытаний общий прирост алмазных кристаллов в концентрате липкостной сепарации увеличился в 2,5 раза, а в концентрате пенной сепарации — в 1,3 раза.

Выводы

Опытная апробация отдельных циклов технологии с применением методов интенсификации процессов глубокого обогащения алмазосодержащего материала природного и техногенного происхождения различных месторождений Якутии подтвердила их технологическую эффективность и возможность получения качественных конечных концентратов широкого класса крупности.

1. На основе комплекса аналитических, экспериментальных и технологических исследований впервые для условий тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения определена оптимальная глубина азотированного слоя на поверхности ферросилициевых гранул (30-60 нм), обеспечивающая снижение скорости коррозии ферросилиция в 2,7 раза.

2. В качестве межциклового операции обоснована и экспериментально апробирована двухстадийная магнитная сепарация, включающая последовательное выделение сильномагнитных минералов в слабых (до 2000 Э) и слабомагнитных в сильных (до 14000 Э) магнитных полях, что позволяет сократить выход концентрата ТСС крупностью $-6+1$ мм на 29-95 % за счет удаления сидерита в зависимости от его исходного содержания в руде.

3. Стендовые испытания на рентгенолюминесцентном сепараторе «Полюс-М» подтвердили эффективность применения люминофорсодержащих реагентов для модифицирования спектрально-кинетических характеристик слабо- и аномально люминесцирующих алмазов, обеспечивающих полное извлечение ранее не извлекаемых алмазов при допустимом выходе кимберлита не более 2,5%.

4. Применение ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий на рудную пульпу, содержащую кристаллы алмазов класса $-6+0,5$ мм, обеспечивает эффективность их комбинированного использования в технологии глубокого обогащения алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения. Степень очистки поверхности кристаллов от гидрофилизирующих минеральных образований составила в среднем от 92 до 95 %.

5. Подтверждена эффективность разработанной в Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук технологии отмывки алмазосодержащих концентратов перед процессом их высокотемпературной сушки, обеспечивающей общий прирост извлечения алмазов класса -6 мм в среднем 25,8 % (с 73,9 до 99,2 %). ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Leontiev R.G., Arkhipova Y.A. Development of the mining complex of the Russian Far East // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021 723(5) 052014 doi:10.1088/1755-1315/723/5/052014
2. Ivannikov, A.L., Kongar-Syuryun, C., Rybak, J., Tyulyaeva, Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. 2019. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 362(1), 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012130
3. Горячев Б. Е. Технология алмазосодержащих руд. Алмазы, кимберлиты, минералы кимберлитов. Минерально-сырьевая база алмазодобывающей промышленности мира // МИСиС. Москва. 2010. 326 с.
4. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий Том: 12 Номер: 2 (44) Год: 2020 Страницы: 283-290.
5. Bogdanovich, A.V., Vasilyev, A.M., & Urnysheva, S.A. Effect of diamond-bearing ores preparation on the technology of their beneficiation // Obogashchenie Rud, 2017, (2), 10-15. doi:10.17580/or.2017.02.02
6. Отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах месторождений алмазов группы компаний «АЛРОСА». «Майкон Интернэшнл Ко Лимитед». 2013. - 468 с.
7. Чантурия В.А., Бондарь С.С., Годун К.В., Горячев Б.Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира (Часть 2) // Горный журнал. 2015. N2 С. 67-75. 10.17580/gzh.2015.03.11
8. Коннова Н.И., Килин С.В. Теория и практика современной сепарации в тяжелых средах. Моделирование результатов тяжелосредного обогащения // Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. - 119 с.
9. Napier-Munn, T. The dense medium cyclone - past, present and future // Minerals Engineering, 2018, 116, 107-113. doi:10.1016/j.mineng.2017.10.002
10. Верхотуров М.В., Амелин С.А., Коннова Н.И. Обогащение алмазов // Учебное пособие. Сибирский федеральный университет. 2009. 207 с.
11. Петрова Л.Г., Тимофеева Г.Ю., Демин П.Е., Косачев А.В. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов // учеб. пособие под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. - М.: МАДИ, 2016. - 148 с.
12. Тимофеев А.С., Двойченкова Г.П., Никитина Ю.Н. Экспериментальное обоснование возможности снижения объема черновых концентратов тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья на основе данных фракционного и минералогического анализов // Материалы международной конференции «Плаксинские чтения - 2022», г. Владивосток, С. 208-210.
13. Agrosi, G., Nestola, F., Tempesta, G., Bruno, M., Scandale, E., & Harris, J. X-ray topographic study of a diamond from Udachnaya: Implications for the genetic nature of inclusions // Lithos, 2016, 248-251, 153-159. doi:10.1016/j.lithos.2016.01.028
14. Монастырский В.Ф., Макалин И.А. Повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья // Наука и образование, 2017, №3.
15. Demchenko A.P. Introduction to fluorescence sensing. Volume 1: Materials and Devices. New York: Springer. 3rd ed. - 2020. - 673 p.
16. Мартынович Е.Ф. Миронов В.П. Рентгенолюминесценция алмазов и ее использование в алмазодобывающей промышленности // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 12/3. С. 202-210.
17. Чантурия В.А., Морозов В.В., Двойченкова Г.П., Чантурия Е.Л. Повышение извлекаемости алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации с применением люминофорсодержащих композиций // Журнал «Устойчивое развитие горных территорий» V.14, №3(53), С. 410-421 DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-410-421
18. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Чантурия Е.Л., Тимофеев А.С. Интенсификация процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 5, С.95-108
19. Злобин М. Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. 2011. № 1. С. 87-89.
20. Островская Г.Х. Экспериментальное обоснование композиционных составляющих и механизма действия эмульсии ЭДТ-100 в схеме отмывки алмазосодержащих концентратов от жировой мази // Горн. инф.-аналит. бюллетень. - 2015. - №9. - С. 106-113.

REFERENCES

1. Leontiev R.G., Arkhipova Y.A. Development of the mining complex of the Russian Far East // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021 723(5) 052014 doi:10.1088/1755-1315/723/5/052014
2. Ivannikov, A.L., Kongar-Syuryun, C., Rybak, J., Tyulyaeva, Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. 2019. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 362(1), 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012130
3. Goryachev B. E. Technology of diamond-containing ores. Diamonds, kimberlites, kimberlite minerals. Mineral resource base of the world's diamond mining industry // MISiS. Moscow. 2010. 326 p.
4. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and technical system // Sustainable development of mountain territories Volume: 12 Issue: 2 (44) Year: 2020 Pages: 283-290.
5. Bogdanovich, A.V., Vasilyev, A.M., & Urnysheva, S.A. Effect of diamond-bearing ores preparation on the technology of their beneficiation // Obogashchenie Rud, 2017, (2), 10-15. doi:10.17580/or.2017.02.02
6. Report of independent experts on the reserves and resources of diamond deposits of the ALROSA group of companies. Micon International Co. Limited. 2013. - 468 p.
7. Chanturia V.A., Bondar S.S., Godun K.V., Goryachev B.E. The current state of the diamond mining industry in Russia and the main diamond-mining countries of the world (Part 2) // Mining Journal. 2015. N2 S. 67-75. 10.17580/gzh.2015.03.11

8. Konnova N.I., Kilin S.V. Theory and practice of modern separation in heavy media. Modeling the results of heavy medium enrichment // Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2013. - 119 p.
9. Napier-Munn, T. The dense medium cyclone - past, present and future // Minerals Engineering, 2018, 116, 107-113. doi:10.1016/j.mineng.2017.10.002
10. Verkhoturov M.V., Amelin S.A., Konnova N.I. Enrichment of diamonds // Textbook. Siberian Federal University. 2009. 207 p.
11. Petrova L.G., Timofeeva G.Yu., Demin P.E., Kosachev A.V. Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys // textbook. allowance under general ed. G.Yu. Timofeeva. - M.: MADI, 2016. - 148 p.
12. Timofeev A.S., Dvoychenkova G.P., Nikitina Yu.N. Experimental substantiation of the possibility of reducing the volume of rough concentrates of the heavy-medium separation of diamond-containing raw materials based on fractional and mineralogical analysis data // Proceedings of the international conference "Plaksinsky Readings - 2022", Vladivostok, pp. 208-210.
13. Agrosi, G., Nestola, F., Tempesta, G., Bruno, M., Scandale, E., & Harris, J. X-ray topographic study of a diamond from Udachnaya: Implications for the genetic nature of inclusions // Lithos, 2016, 248-251, 153-159. doi:10.1016/j.lithos.2016.01.028
14. Monastyrsky V.F., Makalin I.A. Improving the efficiency of X-ray luminescent separation of diamond-containing raw materials // Science and Education, 2017, No. 3.
15. Demchenko A.P. Introduction to fluorescence sensing. Volume 1: Materials and Devices. New York: Springer. 3rd ed. - 2020. - 673 p.
16. Martynovich E.F. Mironov V.P. X-ray luminescence of diamonds and its use in the diamond mining industry. Izv. universities. Physics. 2009. V. 52. No. 12/3. pp. 202-210.
17. Chanturia V.A., Morozov V.V., Dvoychenkova G.P., Chanturia E.L. Increasing the recoverability of diamonds in the process of X-ray luminescence separation using phosphor-containing compositions // Journal "Sustainable Development of Mountain Territories" V.14, No. 3(53), P. 410-421 DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-410 -421
18. Chanturiya V.A., Dvoychenkova G.P., Chanturiya E.L., Timofeev A.S. Intensification of separation processes of refractory diamond-bearing raw materials of primary, placer and technogenic deposits // Physico-technical problems of mineral development. 2022. No. 5, P.95-108
19. Zlobin M. N. Coarse-grained flotation technology for beneficiation of diamond-bearing ores // Mining Journal. 2011. No. 1. pp. 87-89.
20. Ostrovskaya G.Kh. Experimental substantiation of the compositional components and the mechanism of action of the EDT-100 emulsion in the scheme of washing diamond-containing concentrates from fatty ointment // Gorn. inf.-analyst. bulletin. - 2015. - No. 9. pp. 106-113.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Чантурия Валентин Алексеевич:
доктор технических наук,
профессор,
академик РАН,
советник РАН,
главный научный сотрудник Института проблем
комплексного освоения недр им. академика
Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
тел: +7(495)360-06-06, e-mail: vchan@mail.ru



Двойченкова Галина Петровна:
доктор технических наук,
доцент,
главный научный сотрудник Института проблем
комплексного освоения недр им. академика
Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
профессор Мирнинского Политехнического
института филиала Северо-Восточного
федерального университета им. М.К. Аммосова
(МПТИ (ф) СВФУ),
г. Мирный, Россия,
e-mail: dvoigp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chanturia V.A.:
doctor of engineering sciences,
professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
Advisor to the Russian Academy of Sciences,
chief research scientist,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
e-mail: vchan@mail.ru

Dvoichenkova G.P.:
doctor of engineering sciences,
chief research scientist,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
professor,
North-Eastern Federal University,
Mirnyy, Russia,
e-mail: dvoigp@mail.ru



Чантурия Елена Леонидовна:
доктор технических наук,
профессор,
кафедра «Обогащения и переработки полезных
ископаемых и техногенного сырья»,
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»,
г. Москва, Россия,
e-mail: elenachan@mail.ru

Chanturia E.L.:
doctor of engineering sciences,
professor,
National University of Science and Technology
«MISIS»,
Moscow, Russia,
e-mail: elenachan@mail.ru



Тимофеев Александр Сергеевич:
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова Российской
академии наук,
г. Москва, Россия,
e-mail: timofeev_ac@mail.ru

Timofeev A.S.:
candidate of engineering sciences,
senior research scientist,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
e-mail: timofeev_ac@mail.ru



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Аккредитованная Лаборатория ЭКОН в составе Отдела теории проектирования освоения недр ИПКОН РАН проводит НИР с подготовкой Заключений для предприятий России об опасности взрыва (воспламенения) серной или сульфидной пыли при отработке месторождений колчеданных, антимонитовых и полиметаллических руд.

Направления деятельности:

- ✦ анализ исходных данных и горно-технических условий разработки месторождений;
- ✦ анализ химического состав руд и пород;
- ✦ исследование текстурно-структурного строения керна (или крупнообломочного материала);
- ✦ изучение процессов выделения/поглощения тепла при взаимодействии пыли с нагретыми поверхностями и контакте с ВВ;
- ✦ оценка риска опасности взрыва сульфидной пыли в горных выработках рудника при ведении подземных горных работ
- ✦ разработка технологических мероприятий и рекомендаций для предотвращения взрывов сульфидной пыли и возгорания колчеданных руд и пород.



Подготовленные ранее аналогичные Заключение в составе Отчетов о НИР успешно принимаются в составе проектной документации Главгосэкспертизой.

Контакты:

Адрес: 111020, г. Москва,
Крюковский туп., д.4.
E-mail: geo-science@mail.ru
Тел: +7 (916)087-54-44
Сайт: <https://ипконран.рф/>
<http://labecomine.com/>

