

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ ТРУДНООБОГАТИМОГО АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

В. А. Чантурия¹, Г. П. Двойченкова^{1,2}, Е. Л. Чантурия³, А. С. Тимофеев¹

¹Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: dvoigr@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Мирнинский политехнический институт, филиал Северо-Восточного федерального университета
им. М. К. Аммосова, ул. Тихонова, 5, корп. 1, 678174, г. Мирный, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет МИСиС,
Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности повышения качества конечных концентратов тяжелосредной, рентгенолюминесцентной, липкостной и пенной сепарации. Предложен метод азотирования поверхности ферросилициевых гранул в пределах значений глубины измененного слоя (30–60 нм) для снижения скорости коррозии ферросилиция в 2.7 раза при сохранении его технологических свойств. Показана необходимость применения в цикле первичной тяжелосредной двухстадийной магнитной сепарации для снижения выхода черновых концентратов и повышения их качества за счет удаления сидерита на 29–95 %. Выбран оптимальный состав люминофорсодержащего реагента-модификатора, обеспечивающий практически полное извлечение в концентрат ранее не извлекаемых алмазов при выходе кимберлита не более 2.5 %. Стендовыми испытаниями в условиях переработки труднообогащаемого алмазосодержащего сырья подтверждена возможность получения прироста алмазов в концентраты липкостной (14.0 %) и пенной (12.7 %) сепарации, а также в цикле доводочных операций рентгенолюминесцентной сепарации (25.3 %) за счет модифицирования свойств поверхности извлекаемых кристаллов физико-химическими и энергетическими методами.

Алмазы, минералы, ферросилиций, суспензия, сепарация, цикл, доводка, модифицирование, извлечение, эмульсия

DOI: 10.15372/FTPRPI20230512

Проблемы алмазодобывающей отрасли, несмотря на уникальность ее конечной продукции, типичны для всей горнодобывающей промышленности. Снижение и ограниченность разведанных запасов алмазосодержащих месторождений при ухудшении качества сырья текущей добычи обуславливает необходимость увеличения глубины его переработки за счет повышения эффективности и комплексности технологических процессов сепарации [1–4].

Последовательность технологических операций, применяемая в современных комбинированных схемах переработки труднообогащаемого алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения, приведена на рис. 1.

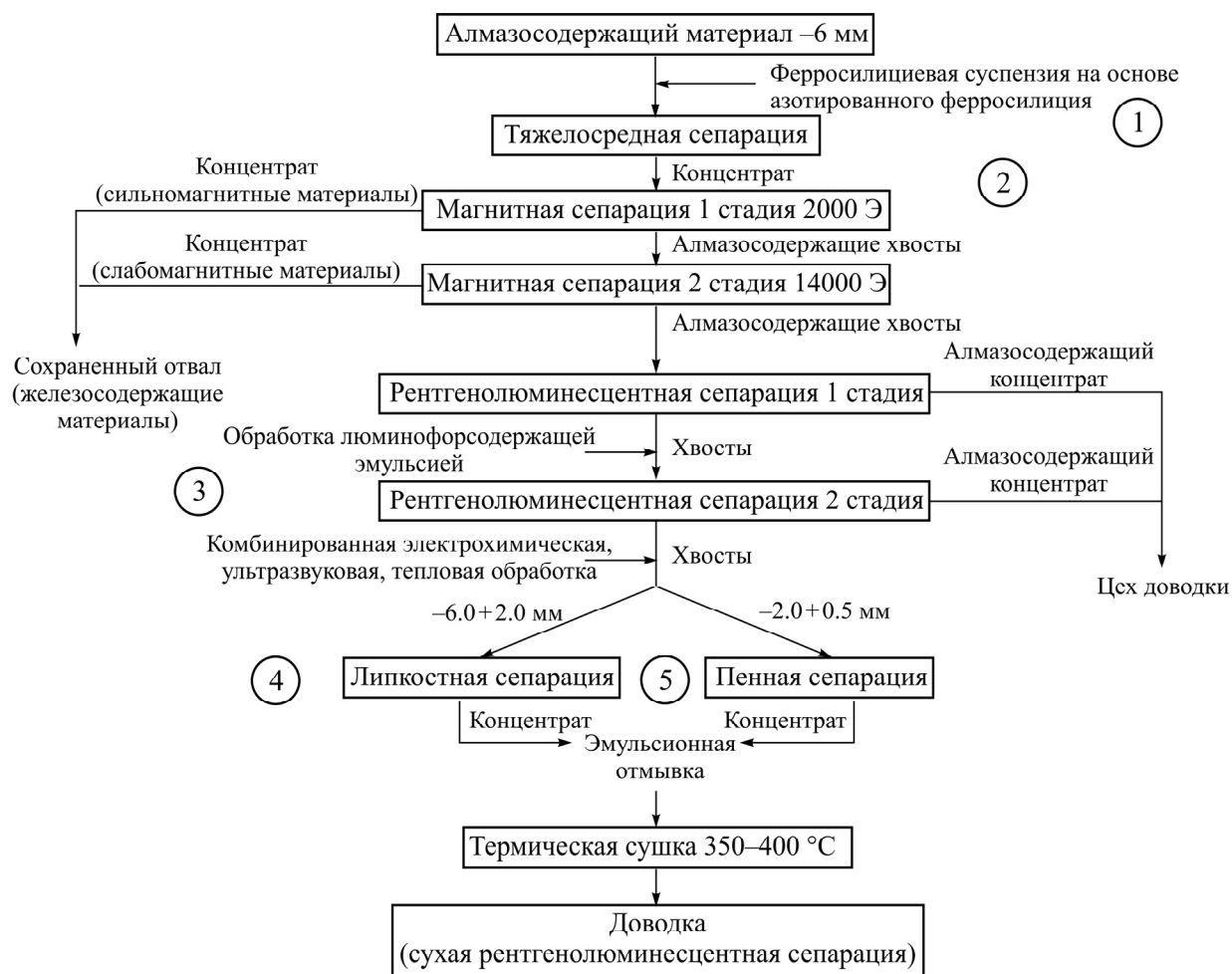


Рис. 1. Принципиальная схема технологической последовательности применения методов для интенсификации современных процессов сепарации алмазосодержащего материала

Данный вариант компоновки учитывает вещественный состав перерабатываемого алмазосодержащего материала и технологические особенности процессов сепарации как основных циклов обогащения, так и циклов доводки черновых концентратов [5].

1. Процесс тяжелосредной сепарации (ТСС), представленный в схеме как первичная сепарация алмазосодержащего материала, сохраняет стабильные технологические показатели при условии коррозионной устойчивости дорогостоящего ферросилиция, потери которого достигают 800 г/т исходного сырья рассматриваемого вещественного состава. Это обуславливает актуальность повышения его коррозионной устойчивости в современных условиях реализации данного процесса.

2. Эффективность процессов рентгенолюминесцентной (РЛС), липкостной (ЛС) и пенной (ПС) сепараций, выполняющих роль первого цикла доводочных операций чернового концентрата ТСС, обусловлена контрастностью природных значений люминесценции и гидрофобности поверхности извлекаемых алмазов и сопутствующих минералов, а именно:

— стоимость кристаллов крупнее 2 мм составляет более 75 % от стоимости всей товарной продукции, что делает задачу извлечения алмазов со слабой или аномальной светимостью, не детектируемых в действующих схемах РЛС, актуальной и достаточно перспективной;

— стоимость кристаллов, теряемых с хвостами процессов ЛС и ПС из-за наличия на их поверхности гидрофилизирующих образований, составляет свыше 20 млн долл./год, поэтому повышение их извлечения актуально и экономически целесообразно.

3. Эффективность процессов рентгенолюминесцентной сепарации концентратов ЛС и ПС, реализуемых методом сухой РЛС и выполняющих роль второго цикла доводочных операций концентрата ТСС, обусловлена степенью чистоты отмытки алмазосодержащего материала перед термической сушкой от органических остатков жировой мази и мазута, несгоревшая часть которых делает поверхность алмазов практически недоступной для их извлечения методом РЛС.

Поскольку каждый из описанных технологических циклов имеет свои требования к условиям эффективной реализации, необходимо разработать способы последовательного применения и экспериментальной апробации методов достижения эффективного обогащения рассматриваемого алмазосодержащего материала природного и техногенного происхождения. Внедрение таких технологий должно обеспечить получение соответствующих концентратов высокого качества при максимальном извлечении в них кристаллов алмазов.

Цель настоящего исследования заключалась в экспериментальном обосновании ранее предложенной последовательности технологического применения физических, химических, физико-химических и энергетических методов, применением которой достигается эффективная реализация перспективных направлений интенсификации современных процессов сепарации труднообогащаемого алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения за счет модифицирования свойств разделяющих сред, алмазных кристаллов и ферросилиция.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучены компоненты и технологические свойства рудной пульпы, ферросилициевой суспензии, образцы продуктов обогащения процессов ТСС, РЛС, ЛС и ПС в схемах переработки алмазосодержащего сырья различного вещественного состава природного и техногенного происхождения, а также параметры методов модифицирования технологических свойств разделяющих сред, разделяемых кристаллов алмазов и минералов кимберлитового материала.

В экспериментах использованы следующие методы: электронно-микроскопические и рентгенометрические исследования поверхности кристаллов алмазов и сопутствующих минералов, ИК-спектрофотометрия, минералогический анализ проб кимберлита, химические анализы состава водных систем. Предложенные технические решения апробированы лабораторными и стендовыми испытаниями с использованием математической обработки конечных результатов.

Алмазосодержащие и кимберлитовые продукты, пробы ферросилициевых суспензий, отобранные из процессов сепарации алмазосодержащего материала в соответствии со схемой, исследованы в лабораториях Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, Научно-исследовательского геологического предприятия и института “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА” при участии Ю. А. Подкаменного, О. Е. Ковальчука, Е. Г. Коваленко, Ю. Н. Никитиной, Г. Х. Островской.

Согласно предложенному алгоритму, экспериментальная оценка эффективности рассматриваемых методов интенсификации процессов сепарации алмазосодержащего материала выполнена в пяти последовательных точках технологической схемы, приведенных на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальная апробация новых технических решений для интенсификации современных процессов сепарации алмазосодержащего сырья различного вещественного состава природного и техногенного происхождения с целью достижения его глубокой переработки выполнена с учетом новых научных знаний и рекомендаций, разработанных в предыдущих исследованиях под руководством академика РАН В. А. Чантурия [6, 7].

Обеспечение эффективности процесса тяжелосредной сепарации. Экономические показатели процесса тяжелосредной сепарации в большой степени обусловлены коррозионной устойчивостью ферросилиция, применяемого в качестве утяжелителя ферросилициевой суспензии [8–11]. Для достижения необходимого эффекта предложено техническое решение, предусматривающее повышение коррозионной устойчивости гранул ферросилиция за счет модифицирования антикоррозионных свойств их поверхности методом азотирования.

Ранее выполненными теоретическими и экспериментальными исследованиями обоснован и разработан способ подготовки ферросилиция для применения в условиях ТСС. Он включает азотирование поверхности ферросилициевых гранул в режимах, обеспечивающих образование на их поверхности нитридной оболочки, которая повышает коррозионную устойчивость ферросилиция вследствие снижения до 50 % скорости его окисления в условиях контакта с минерализованными водными системами.

Результатами настоящих исследований экспериментально обоснован режим процесса азотирования ферросилициевых гранул, обеспечивающий их максимальную коррозионную устойчивость при сохранении требуемых процессом ТСС технологических свойств.

Процесс азотирования исходных ферросилициевых гранул изучали при времени обработки 1–3 ч и температуре 900–1100 °С (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Исследуемые режимы процесса азотирования гранул ферросилиция

Режим обработки	Температура термической обработки, °С	Длительность процесса азотирования, ч	Давление азота в рабочей камере печи, атм.	Потеря намагниченности, %	Изменение устойчивости к истиранию, отн. %
Исходный	—	—	—	–51.24	—
1	1100	3	1.25	–73.04	45.46
2	900	3	1.25	–37.09	5.82
3	1000	1	1.25	–23.39	7.00
4	1000	2	1.25	–19.07	7.20
5	1000	3	1.25	–20.21	–5.84
6	1000	1	1.00	–18.54	–6.63

Установлено, что максимально эффективно процесс азотирования протекает при температуре 1000 °С, времени выдержки 2 ч, давлении азота 1.25 атмосфер (режим 4, табл. 1). В таком режиме образованный азотированный слой (30–60 нм) повышает устойчивость ферросилициевых гранул к истиранию на 7.2 % при снижении скорости их коррозии в 2.7 раза (51.24–19.07 %) в условиях взаимодействия с коррозионно-активной минерализованной водной системой процесса ТСС алмазосодержащего материала коренных и россыпных месторождений природного и техногенного происхождения.

При более высоких температурах (1100 °С) или увеличении времени азотирования (режим 1, табл. 1) происходит интенсивный рост кристаллов нитрида кремния, что нарушает технологические свойства ферросилиция.

Совместно с Институтом металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова разработан узел автоматического контроля параметров термической обработки гранул ферросилиция, что позволило избежать нарушения режимов процесса их азотирования и обеспечить получение порошка ферросилиция со стабильными физико-механическими характеристиками, которые соответствуют требованиям технологического процесса тяжелосредной сепарации алмазосодержащего материала.

В результате математической обработки полученных экспериментальных данных установлено, что применение метода азотирования поверхности гранулированного ферросилиция продлевает в 2 раза срок его полезного использования в технологических процессах ТСС трудно-обогащаемого алмазосодержащего сырья как природного, так и техногенного происхождения (рис. 1, операция обработки 1).

Повышение качества черного концентрата ТСС перед процессами его доводки. Получение высококачественных алмазосодержащих концентратов широкого класса крупности обеспечивается в технологических циклах схемы доводки черновых продуктов обогащения, в том числе первичного концентрата ТСС, с использованием методов РЛС, ЛС и ПС. Одним из факторов, создающих эффективность вышеперечисленных доводочных процессов сепарации алмазосодержащих продуктов ТСС, является выход черновых концентратов, в которых присутствуют различные объемы рудных фракций с высоким содержанием тяжелых минералов, в том числе железосодержащих, сильно- и слабомагнитных.

Предложенное в данном случае техническое решение предусматривает введение в технологическую схему межциклового операции магнитной сепарации для достижения необходимого эффекта уменьшения объема черного концентрата ТСС за счет снижения выхода кимберлитового материала вследствие извлечения из него железосодержащих минералов.

Ранее выполненными экспериментальными исследованиями установлена возможность сокращения на 95.80 % выхода первичного концентрата ТСС, характеризующегося высоким содержанием сидерита (до 82.22 %) в присутствии магнетита, магнитной сепарацией при последовательном стадийном усилении магнитного поля от слабого (до 2000 Э) до сильного (до 14000 Э) [12].

С целью обоснования применимости разработанного метода для сокращения выхода черновых продуктов ТСС близкого по составу ценных компонентов сырья, но с более низкими содержаниями железосодержащих минералов в настоящих исследованиях выполнены аналогичные эксперименты на кимберлитовом материале россыпного месторождения, минеральный состав которого представлен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Содержание минералов в исходной пробе кимберлитового материала, %

Концентрат ТСС	Содержание основных минералов									Итого
	Гипс	Кварц	Кальцит	Анортит	Доломит	Сидерит	Пирит	Магнетит	Прочие	
– 6 + 3 мм	0.98	49.05	3.59	3.28	6.49	11.50	20.28	0.04	4.79	100.00
– 3 + 1 мм	1.55	41.58	3.54	0.53	7.61	19.99	12.77	0.04	12.39	
– 6 + 1 мм	1.26	45.40	3.56	1.93	7.04	15.65	16.61	0.04	8.51	

Из представленных в таблице данных следует, что тяжелая фракция кимберлитового материала (– 6 + 1 мм) содержит 15.65 % слабомагнитного минерала — сидерита в присутствии сильномагнитного минерала — магнетита (0.04 %); немагнитные минералы представлены кварцем (45.40 %), пиритом (16.61 %), доломитом (7.04 %), кальцитом (3.56 %), анортитом (1.93 %) и гипсом (1.26 %).

С учетом результатов ранее выполненных исследований и приведенных данных минералогического анализа пробы кимберлитового материала проведена экспериментальная апробация метода выделения из него железосодержащих минералов с применением двухстадийной магнитной сепарации (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Содержание минералов в продуктах экспериментальной магнитной сепарации по классам крупности, %

Минерал	Продукт														
	магнитный 1100 Э			магнитный 2000 Э			магнитный 10000 Э			магнитный 14000 Э			немагнитный		
	–6+3	–3+1	–6+1	–6+3	–3+1	–6+1	–6+3	–3+1	–6+1	–6+3	–3+1	–6+1	–6+3	–3+1	–6+1
Сидерит	0.2	0.9	0.5	0.2	2.4	1.3	48.7	—	—	—	56.9	52.7	0.6	1.3	0.9
Кварц	7.1	6.1	6.6	10.2	10.5	10.3	16.5	—	—	—	13.0	14.8	59.9	56.8	58.4
Магнетит	3.2	4.1	3.6	1.5	2.0	1.7	0	—	—	—	0	0	0	0	0
Пирит	0.4	0.5	0.4	1.1	0.6	0.9	2.3	—	—	—	1.8	2.1	26.2	18.6	22.5
Кальцит	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	1.5	—	—	—	0	0.8	4.3	5.4	4.8
Доломит	0	0	0	0	0	0	5.7	—	—	—	3.0	4.4	6.9	10.1	8.5
Анортит	57.2	54.4	55.8	57.5	50.8	54.2	9.4	—	—	—	0	4.8	0	0	0
Авгит	12	9.5	10.8	10.1	14.8	12.4	3.2	—	—	—	0	1.6	0	0	0
Биотит	7.4	8.2	7.8	9.1	5.7	7.4	2.9	—	—	—	0	1.5	0	0	0
Роговая обманка	4.6	5.3	4.9	5.7	6.1	5.9	0.8	—	—	—	0.6	0.7	0	0	0
Ильменит	4.1	6.4	5.2	2.1	5.6	3.8	0	—	—	—	0.1	0	0	0	0
Гипс	0.3	0	0.4	0	0	0	0	—	—	—	0.7	0.3	1.3	2.1	1.7
Гётит	0	0	0	0	0	0	8.8	—	—	—	6.6	7.7	0	0.9	0.4
Мусковит	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	6.3	3.1	0	0	0
Пироп	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	6.2	3.0	0	4.8	2.3
Другие	3.1	3.5	3.3	2.2	1.0	1.6	0.2	—	—	—	4.8	2.5	0.8	0	0.4
Выход от класса	0.53	0.73	0.63	1.47	0.26	0.88	22.67	—	—	—	33.62	28.03	75.33	65.39	70.46

Примечание. Выход продукта крупностью –6+3 мм составляет 51.08%; –3+1 мм — 48.92%; –6+1 мм — 100.00 %.

Первая стадия экспериментов осуществлена в слабых магнитных полях (1100 и 2000 Э), вторая — в сильных магнитных полях (10000 и 14000 Э), что соответствовало условиям предыдущих испытаний на аналогичном кимберлитовом материале.

Полученными данными минерального состава продуктов магнитной сепарации первичного концентрата ТСС исследуемой кимберлитовой пробы подтверждена высокая степень извлечения железосодержащих минералов в магнитный продукт и высокая степень содержания немагнитных минералов в хвостах двухстадиальной магнитной сепарации.

Экспериментальная апробация применения магнитной сепарации для снижения выхода кимберлитового материала (–6+1 мм) концентрата ТСС подтвердила ее эффективность, обусловленную сокращением выхода концентрата ТСС на 29.53 % за счет удаления сидерита и магнетита. Результаты исследования доказана возможность использования разработанного технического решения в схемах обогащения алмазосодержащего материала аналогичного минерального состава (рис. 1, операция обработки 2).

Повышение извлечения алмазов в цикле РЛС за счет увеличения выходов из хвостов основной операции слабо- и аномально люминесцирующих кристаллов. Согласно данным Научно-исследовательского геологического предприятия АК “АЛРОСА”, отдельные алмазные кристаллы, относящиеся к группам “низкоазотных” и “высокоазотных” — с содержанием азота

менее 50 ppm либо более 800 ppm соответственно, не извлекаются в условиях действующей рентгенолюминесцентной сепарации. Это обусловлено отклонением их природных спектрально-кинетических характеристик от значений параметров настройки действующих сепараторов [13–15]. Количество алмазов с описанными аномальными характеристиками природной люминесценции оценивается в пределах 2–6 % от исходного содержания в месторождении.

Предложенное техническое решение предусматривает достижение необходимого эффекта дополнительного извлечения слабо- и аномально люминесцирующих алмазов в действующих схемах РЛС за счет модифицирования их природных спектрально-кинетических характеристик методом обработки алмазосодержащего материала люминофорсодержащими реагентами разработанного состава.

Для модифицирования значений природных спектрально-кинетических характеристик алмазов в ИПКОН РАН разработаны состав и способ приготовления люминофорсодержащих эмульсий [16]. Результаты экспериментальной оценки технического решения с использованием опытного рентгенолюминесцентного сепаратора “Полус-М” показали эффективность его применения (рис. 1, операция обработки 3). Это подтверждается настоящими исследованиями — практически полным извлечением ранее не извлекаемых алмазов при выходе кимберлита не более 2.5 %, что является допустимым в условиях действующей РЛС (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Состав и свойства люминофорсодержащих композиций для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов, %

Люминофорсодержащие композиции в опытах	Люминофор в композиции, марка	Органический коллектор в эмульсии, марка и % по массе	Содержание люминофора в композиции, %	Извлечение кристаллов в сепараторе “Полус-М”	
				алмаза	кимберлита
Без обработки	—	—	—	20.0	1.7
МЛА-1	ФЛ-530Г	Тяжелый газойль каталитического крекинга 80–90 % и дизельная техническая фракция 10–20 %	1–2	100.0	2.5
МЛА-2	ФЛ-530Г и антрацен (25–40):1	Дизельная техническая фракция	1–2	100.0	2.3

Необходимое повышение интенсивности люминесценции алмазных кристаллов обеспечивает дополнительный прирост алмазов и достигается модифицированием спектрально-кинетических характеристик алмазов люминофорсодержащими реагентами. Разработанный состав композиции включает 1–2 % люминофора в органическом коллекторе, который позволяет поддерживать устойчивость и необходимую селективность закрепления люминофорсодержащей композиции на кристаллах алмазов и кимберлита.

Пример применения люминофорсодержащей эмульсии установленного состава для корректировки спектрально-кинетических характеристик нелюминесцирующего и, соответственно, не извлекаемого в схеме РЛС алмазного кристалла, находящегося в смеси с минералами кимберлита, приведен на рис. 2. В условиях ультрафиолетового (УФ) освещения отчетливо наблюдается усиление сигнала люминесценции алмаза при практически полном его отсутствии на минералах кимберлита.

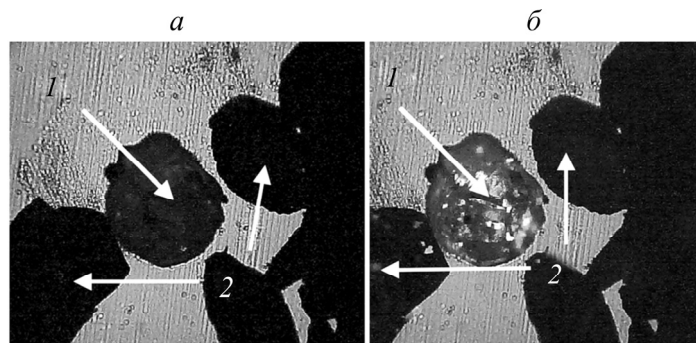


Рис. 2. Кристаллы алмаза (1) и кимберлита (2), обработанные люминофорсодержащей эмульсией при дневном (а) и ультрафиолетовом (б) освещении

Повышение извлечения алмазов класса – 6 мм за счет снижения их потерь в основных процессах липкостной и пенной сепарации. На основе результатов исследований, выполненных институтами ИПКОН РАН и “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА” на материале кимберлитовых руд трубок “Мир”, “Интернациональная” в условиях стендовых, полупромышленных и промышленных испытаний, установлено, что невозвратные потери алмазов класса крупности – 6 мм с хвостами процессов липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего сырья достигают 25 % и более [17 – 19].

Методами оптической микроскопии, ИК-спектроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на поверхности кристаллов, извлеченных из хвостов ЛС и ПС, диагностированы гидрофилизирующие образования, характеризующиеся линейными размерами 0.01 – 5.0 мм и толщиной 5 – 350 мкм. Эти образования снижают природные гидрофобные свойства алмазов и, соответственно, их способность извлекаться в процессе сепарации.

Для удаления гидрофилизирующих образований определенного строения с поверхности кристаллов, восстановления их природной гидрофобности и достижения эффекта повышения извлечения алмазов класса – 6 мм в концентраты липкостной и пенной сепарации коллективом специалистов институтов ИПКОН РАН, “Якутнипроалмаз” и НИГП АК “АЛРОСА” научно обоснована и разработана комбинированная технология интенсификации процессов липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего сырья на основе инновационных методов модифицирования технологических свойств разделяющих сред и минеральных компонентов. Технология совмещает ультразвуковые, тепловые и электрохимические воздействия на рудную пульпу перед процессами ЛС и ПС.

Результаты опытно-промышленных испытаний комбинированных энергетических методов модифицирования гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности алмазов в схемах переработки кимберлитов коренных месторождений трубок “Мир”, “Интернациональная” и “Нюрбинская” подтвердили технологическую эффективность их применения в циклах ЛС и ПС, обусловленную увеличением извлечения алмазов за счет синергетического эффекта усиления гидрофобизации поверхности извлекаемых кристаллов [20 – 22].

Для подтверждения универсальности разработанной технологии гидрофобизации алмазных кристаллов в настоящих исследованиях выполнены аналогичные эксперименты по ее апробации на общей массе кимберлитового материала и кристаллах алмазов класса – 6 мм, извлеченных из продуктов переработки алмазоносных месторождений Западной Якутии различного вещественного состава природного и техногенного происхождения.

Поверхность исследованных кристаллов отобранной коллекции характеризовалась наличием гидрофилизирующих образований, установленных результатами ранее проведенных экспериментов и представляющих собой совокупность различных комбинаций массивных рельефных корок и шламовых покрытий. С учетом имеющихся данных об их строении, способах закрепления и методах удаления с поверхности кристаллов алмазов выполнены эксперименты с применением технологии совмещения электрохимических (ЭХ), ультразвуковых (УЗ), тепловых с использованием горячего пара воздействий (ТП) для обработки хвостов РЛС крупностью – 6 мм перед разделением на классы – 6 + 2 и – 2 + 0.2 мм с последующей их сепарацией методами ЛС и ПС соответственно (рис. 1, операция обработки 4).

На рис. 3 представлены примеры очистки поверхности гидрофильных алмазных кристаллов исследуемой коллекции за счет синергетического эффекта, проявленного вследствие применения разработанной технологии совмещения ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий при обработке общей массы алмазных кристаллов крупностью – 6 мм.

С использованием современных методов анализа поверхности алмазных кристаллов установлено, что в условиях экспериментов средняя степень их очистки от гидрофилизирующих минеральных образований составила в среднем 92 – 95 % при увеличении краевого угла смачивания в среднем от 48.6° (без обработки) до 86.4° (после обработки).

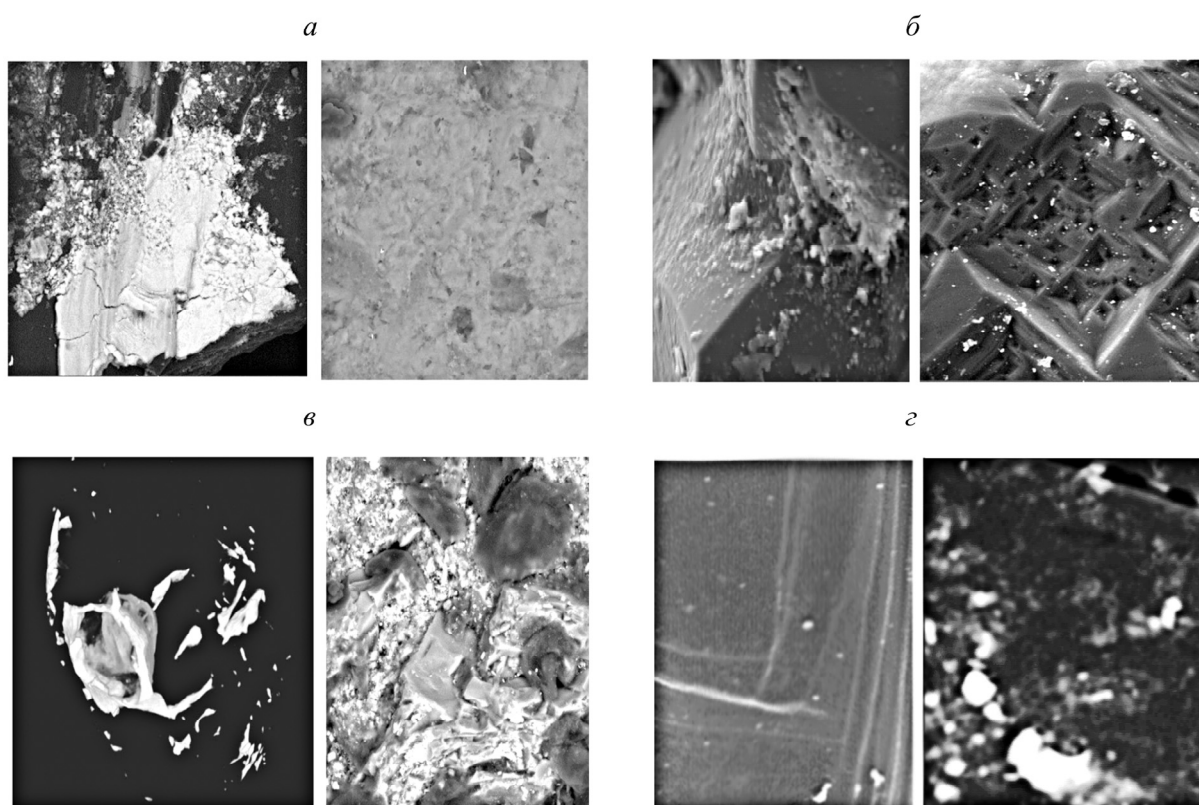


Рис. 3. Электронные изображения поверхности исследуемых алмазов до и после комплексной обработки методами гидрофобизации: *а* — на ровной поверхности; *б* — во впадинах; *в* — в трещинах и сколах; *г* — после комплексной обработки методами гидрофобизации

Результаты стендовых испытаний подтвердили технологическую эффективность разработанной комбинированной технологии (табл. 5). Прирост извлечения алмазов в концентраты липкостной и пенной сепарации составил 14.0 и 12.7 % соответственно.

ТАБЛИЦА 5. Результаты стендовых испытаний липкостной и пенной сепарации, %

Условия опытной сепарации	Извлечение алмазов в концентрат	Прирост извлечения алмазов
Пенная сепарация (стандартный режим)	84.0	—
Пенная сепарация после комбинированной обработки исходного материала	96.7	12.7
Липкостная сепарация (стандартный режим)	81.7	—
Липкостная сепарация после комбинированной обработки исходного материала	95.7	14.0

Снижение потерь алмазов в цикле доводки концентратов липкостной и пенной сепарации методом сухой РЛС. Действующая на современных обогатительных фабриках АК “АЛРОСА” технология глубокого обогащения алмазосодержащего сырья на заключительной стадии включает операции доводки концентратов основных циклов ЛС и ПС крупностью – 6 мм методом сухой рентгенолюминесцентной сепарации.

Для эффективной реализации доводки алмазосодержащего материала методом сухой РЛС требуется качественная отмывка поступающих в схему концентратов перед их высокотемпературной (350–400 °С) сушкой от остатков органических реагентов: жировой мази, используемой в ЛС, и мазута, используемого в ПС. В действующих схемах фабрик отмывка концентратов от жировых примесей осуществляется горячей водой (~90 °С) с кальцинированной содой [23].

На продуктах обогащения кимберлитов Мирнинского рудного поля ранее установлена низкая эффективность существующей технологии отмывки кристаллов от органических примесей. На поверхности кристаллов по этой причине образуются непрозрачные пленки из несгоревших остатков органических реагентов (рис. 4), и, как следствие, снижается интенсивность люминесценции алмазов и их извлечение в концентраты РЛС.



Рис. 4. Непрозрачные пленки на поверхности алмазов, извлеченных из хвостов РЛС доводочных операций

Для интенсификации процесса отмывки алмазов от жировой мази и мазута перед процессом высокотемпературной сушки, восстановления интенсивности их люминесцентных свойств и снижения потерь алмазов класса – 6 мм в цикле РЛС доводки черновых алмазосодержащих концентратов основных операций ЛС и ПС разработана водоземulsionная технология.

В ИПКОН РАН создан эффективный эмульсионный реагент на основе дизельного топлива ЭДТ-100, композиция которого включает углеводородные компоненты и ПАВ в определенном соотношении. Эффективное действие реагента основано на бинарном действии, обуславливающем перевод жировых образований на поверхности кристаллов в масляную фазу и дальнейшее растворение ее в водной фазе [24].

В ходе экспериментальной апробации разработанной технологии в условиях промышленных испытаний схемы доводки концентратов ЛС и ПС, полученных при переработке кимберлитов коренных месторождений трубок “Мир” и “Интернациональная”, установлена возможность повышения извлечения алмазов класса – 5 мм в 3.3 раза.

Аналогичные эксперименты, выполненные авторами на кимберлитовом материале и алмазных кристаллах крупностью – $6 + 0.2$ мм, извлеченных из продуктов переработки различных алмазоносных месторождений Западной Якутии природного и техногенного происхождения, подтвердили универсальность и эффективность технологии отмывки алмазосодержащих концентратов перед процессами их доводки.

На рис. 5 представлены фотографии проб алмазосодержащих концентратов, отобранных в период испытаний и отмытых перед подачей в цикл высокотемпературной сушки по двум вариантам: по стандартной фабричной технологии с использованием горячего содового раствора и по разработанной технологии с помощью созданного эмульсионного реагента.

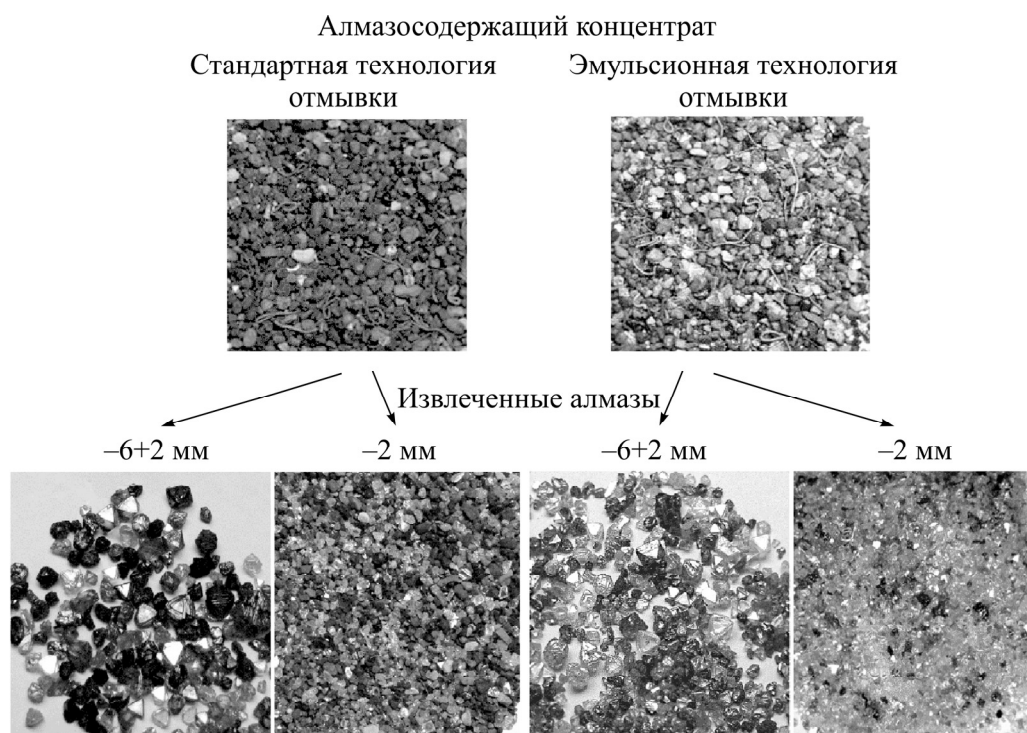


Рис. 5. Пробы алмазосодержащих концентратов и извлеченных из них алмазных кристаллов в исследуемых условиях

В экспериментах отмывки по первому варианту поверхность кимберлитового материала и извлеченных из него алмазов покрыта плотной черной пленкой. Аналогичные продукты, полученные по второму варианту отмывки, отличаются совершенно чистой (кимберлит) и прозрачной (алмазы) поверхностью.

На определенных этапах испытаний, согласно разработанной методике, из проб алмазной продукции отобраны кристаллы алмазов, поверхность которых исследована с применением методов УФ- и ИК-спектроскопии.

Спектрограммы, полученные методом люминесцентной спектроскопии с использованием ультрафиолетового лазера с длиной волны 337 нм, свидетельствуют о том, что загрязнение поверхности кристаллов органическими примесями приводит к практически полному отсутствию эффекта люминесценции алмазных кристаллов вследствие невозможности проникновения луча лазера внутрь кристалла с черной пленкой на его поверхности (рис. 6).

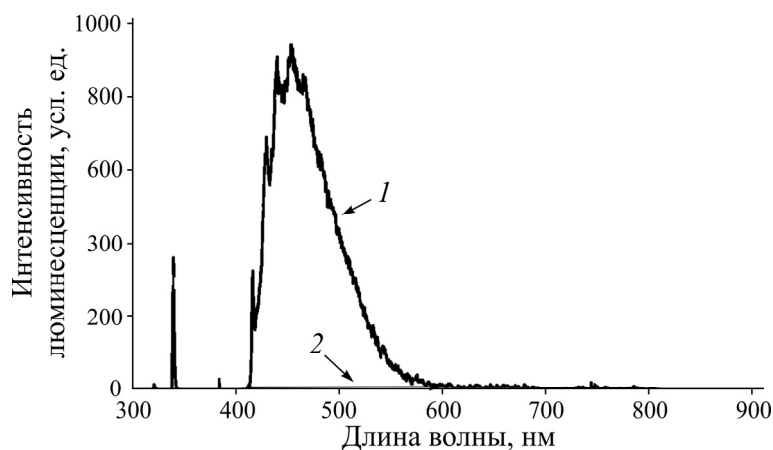


Рис. 6. УФ-спектры люминесценции исследуемых алмазных кристаллов: 1 — с чистой поверхностью (эталон); 2 — с термически обработанной черной пленкой органических примесей на поверхности

Однако предварительная отмывка алмазов от используемых реагентов (жировая мазь и мазут) эмульсионным методом перед термообработкой позволяет полностью восстановить исходную люминесценцию кристаллов (рис. 7). При отмывке перед термической сушкой алмазо-содержащего концентрата эмульсионным методом спектр поверхности алмазного кристалла полностью соответствует спектру природного алмаза, что свидетельствует о высокой степени чистоты поверхности алмаза, а также об исключении потерь кристаллов в цикле доводочных операций с использованием сухой РЛС.

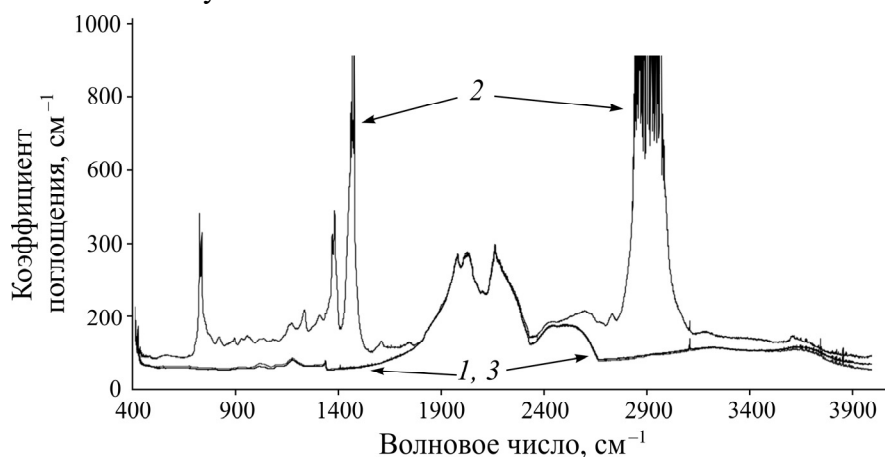


Рис. 7. ИК-спектрограммы поверхности исследуемых алмазных кристаллов: 1 — с чистой поверхностью (эталон); 2 — с термически обработанной черной пленкой органических примесей на поверхности (базовая технология отмывки); 3 — с термически обработанной чистой поверхностью (эмульсионная технология отмывки)

Характер изменения спектральных характеристик, приведенных на рис. 6 и 7, подтверждает эффективность эмульсионного метода отмывки алмазных кристаллов в условиях переработки алмазосодержащего сырья различного вещественного состава природного и техногенного происхождения.

Таким образом, применение разработанного эмульсионного метода отмывки алмазосодержащих концентратов ЛС и ПС перед процессом их высокотемпературной сушки позволяет практически на 100 % удалить остатки органических реагентов с поверхности алмазных кристаллов, исключить образование черной пленки несгоревших остатков реагентов на их поверхности и, соответственно, предотвратить потери кристаллов с хвостами доводочных операций РЛС.

Эффективность эмульсионной технологии отмывки черновых алмазосодержащих концентратов основных процессов ЛС и ПС перед их высокотемпературной сушкой подтверждена результатами опробования схемы доводки в отдельные периоды этапов сравнительных опытных испытаний базовой (фабричной) и разработанной (эмульсионной) технологии. Получен средний общий прирост извлечения алмазов класса $-6 + 0.2$ мм на 25.3 % (73.9–99.2 %). За длительный период испытаний на алмазосодержащем сырье различного вещественного состава прирост извлечения алмазных кристаллов в среднем увеличился в 2.5 раза в концентрат липкостной сепарации и в 1.3 раза в концентрат пенной сепарации (рис. 1, операция обработки 5).

ВЫВОДЫ

Теоретически обоснованы, экспериментально подтверждены и проверены в полупромышленных и промышленных условиях способы и технологии интенсификации основных процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья различного вещественного состава и происхождения, обеспечивающие необходимую глубину обогащения и возможность получения качественных конечных концентратов широкого класса крупности.

Впервые с использованием комплекса аналитических исследований установлены пределы значений оптимальной глубины азотированного слоя (30–60 нм) на поверхности гранул ферросилиция, обеспечивающие снижение скорости его коррозии в 2.7 раза при сохранении технологических свойств в промышленных условиях тяжелосредной сепарации алмазосодержащего материала.

Экспериментально обосновано применение в цикле первичной тяжелосредной сепарации двухстадийной магнитной сепарации для последовательного выделения из промежуточных алмазосодержащих продуктов сильномагнитных и слабомагнитных минералов в слабых (2000 Э) и сильных (14000 Э) магнитных полях соответственно. Это значительно повышает качество черновых концентратов тяжелосредной сепарации крупностью $-6 + 1$ мм и снижает их выход за счет удаления сидерита на 29–95 % в зависимости от его исходного содержания в руде.

Лабораторными испытаниями с использованием рентгенолюминесцентного сепаратора “Полюс-М” установлена возможность дополнительного извлечения слабо- и аномально люминесцирующих алмазов в концентраты действующих рентгенолюминесцентных сепараторов при допустимом выходе кимберлита не более 2.5 % за счет модифицирования природных спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов люминофорсодержащими реагентами разработанного состава.

Технология совмещения ультразвуковых, тепловых и электрохимических воздействий на алмазосодержащий материал крупностью -6 мм обеспечивает (по данным стендовых испытаний) очистку поверхности кристаллов от гидрофилизирующих минеральных образований в среднем на 92–95 %. В результате прирост извлечения алмазов в концентраты липкостной и пенной сепараций составляет 14.0 и 12.7 % соответственно.

Эмульсионная технология отмывки алмазосодержащих концентратов перед процессом их высокотемпературной сушки позволяет практически полностью очистить алмазные кристаллы от жировой мази и мазута, что обеспечивает (по данным опытно-промышленных испытаний) общий прирост извлечения алмазов класса $-6 + 0.2$ мм в среднем на 25.3 % (73.9 – 99.2 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leontiev R. G. and Arkhipova Y. A.** Development of the mining complex of the Russian Far East, IOP Conf. Series: Earth and Env. Sci., 2021, Vol. 723, No. 5. — 052014.
2. **Ivannikov A. L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., and Tyulyaeva Y.** The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities, IOP Conf. Series: Earth and Env. Sci., 2019, Vol. 362, No. 1. — 012130.
3. **Горячев Б. Е.** Технология алмазосодержащих руд. Алмазы, кимберлиты, минералы кимберлитов. Минерально-сырьевая база алмазодобывающей промышленности мира. — М.: МИСиС, 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. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 283 – 290.
5. **Bogdanovich A. V., Vasilyev A. M., and Urnysheva S. A.** Effect of diamond-bearing ores preparation on the technology of their beneficiation, Obogashchenie Rud, 2017, Vol. 2. — P. 10 – 15.
6. **Чантурия В. А., Козлов А. П., Шадрюнова И. В., Ожогина Е. Г.** Приоритетные направления развития поисковых и прикладных научных исследований в области использования в промышленных масштабах отходов добычи и переработки полезных ископаемых // Горная пром-сть. — 2014. — № 1. — С. 54.
7. **Чантурия В. А., Бондарь С. С., Годун К. В., Горячев Б. Е.** Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира (Ч. 2) // Горн. журн. — 2015. — № 2. — С. 67 – 75.
8. **Коннова Н. И., Килин С. В.** Теория и практика современной сепарации в тяжелых средах. Моделирование результатов тяжелосредного обогащения. — Красноярск: СФУ, 2013. — 119 с.
9. **Napier-Munn T.** The dense medium cyclone – past, present and future, Min. Eng., 2018, Vol. 116. — P. 107 – 113.
10. **Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И.** Обогащение алмазов. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 207 с.
11. **Петрова Л. Г., Тимофеева Г. Ю., Демин П. Е., Косачев А. В.** Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов. — 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 междунар. конф. “Плаксинские чтения – 2022”. — Владивосток, 2022. — С. 208 – 210.
13. **Agrosi G., Nestola F., Tempesta G., Bruno M., Scandale E., and Harris J.** X-ray topographic study of a diamond from Udachnaya: Implications for the genetic nature of inclusions, Lithos, 2016, Vol. 248–251. — P. 153 – 159.
14. **Монастырский В. Ф., Макалин И. А.** Повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья // Наука и образование. — 2017. — № 3. — С. 86 – 90.

15. Demchenko A. P. Introduction to fluorescence sensing. Vol. 1: Materials and Devices. New York: Springer, 2020. — 673 p.
16. Чантурия В. А., Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Чантурия Е. Л. Повышение извлекаемости алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации с применением люминофорсодержащих композиций // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3 (53). — С. 410–421.
17. Горячев Б. Е., Чекушина Т. В. Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов // Цв. металлы. — 2005. — № 1. — С. 20–23.
18. Мязин В. П., Наркелян Л. Ф., Трубачев А. И. К проблеме геолого-технического изучения руд и критериев их обогатимости // Обогащение руд. — Иркутск: ИрГТУ, 2002. — С. 150–155.
19. Смольников В. А., Бычкова Г. М., Специус З. В. Перспективные способы повышения флотиремости алмазов // Горн. журн. — 1999. — № 5. — С. 33–36.
20. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Чантурия Е. Л., Тимофеев А. С. Интенсификация процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений // ФТПРПИ. — 2022. — № 5. — С. 95–108.
21. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Исследование минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов и условий их деструкции в процессах переработки текущих и отвальных хвостов алмазоизвлекающих фабрик // Горн. журн. — 2019. — № 2. — С. 61–65.
22. Двойченкова Г. П., Коваленко Е. Г., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Повышение эффективности пенной сепарации алмазосодержащего материала за счет комбинированной очистки поверхности алмазов от шламовых гидрофилизирующих покрытий // ГИАБ. — 2022. — № 10. — С. 20–38.
23. Островская Г. Х. Экспериментальное обоснование композиционных составляющих и механизма действия эмульсии ЭДТ-100 в схеме отмывки алмазосодержащих концентратов от жировой мази // ГИАБ. — 2015. — № 9. — С. 106–113.
24. Чантурия В. А., Богачев В. И., Трофимова Э. А., Двойченкова Г. П. Механизм и эффективность водоземulsionной очистки алмазов от жировой мази в процессе липкостной сепарации // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 145–151.

Поступила в редакцию 14/VII 2023

После доработки 25/VIII 2023

Принята к публикации 15/IX 2023