

УДК 622.7:622.371

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТРУДНООБОГАТИМЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ\*



Г. П. ДВОЙЧЕНКОВА,  
проф., канд. техн. наук,  
Мирнинский политехнический  
институт (филиал), Северо-Восточный  
федеральный университет имени  
М. К. Аммосова, Якутск, Россия,  
dvoigp@mail.ru

## Введение

Существующие технологии переработки коренных и техногенных месторождений алмазов достаточно стандартны и определены свойствами ценного компонента — алмаза, составом вмещающих пород, а также низким содержанием алмазов в исходных рудах при высокой ценности кристаллов [1]. Необходимость достижения степени извлечения алмазов более 98 % при высоком содержании мелких кристаллов обуславливает глубину переработки алмазосодержащих руд на уровне 0,5 мм [1, 2]. При этом на основе опыта работы обогатительных фабрик, перерабатывающих кимберлитовые руды, установлено, что основные потери алмазов представлены кристаллами класса –5 мм, в котором концентрируется до 40–45 % их общего количества, что составляет более 15 % стоимости товарной продукции [1, 2].

В действующих технологических схемах переработки кимберлитовых руд алмазы крупностью –5+2 и –2+0,5 мм извлекаются, как правило, на заключительных стадиях в контрольных операциях методами липкостной (ЛС) и пенной (ПС) сепараций, основанных на использовании контрастности гидрофобно-гидрофильного состояния поверхности разделяемых компонентов [2–6].

## Проведенные исследования и их результаты

Институтами ИПКОН РАН, МПТИ(ф) СВФУ, Якутнипроалмаз и НИГП АК «АЛРОСА» в течение ряда лет выполнен ряд исследований процессов обогащения измененных кимберлитов верхних горизонтов, в результате которых установлено следующее:

- содержание измененных минералов в кимберлитовых рудах приводит к образованию на поверхности кристаллов гидрофильных пленок, снижающих степень природной гидрофобности алмазов, что, соответственно, увеличивает их потери в основных операциях обогащения [7, 8];

Методами электронной микроскопии, ИК-спектроскопии на поверхности алмазов из хвостов пенной сепарации диагностированы гидрофильные минеральные образования и установлена эффективность электрохимических воздействий для их удаления в технологических процессах переработки труднообогатимых кимберлитов.

**Ключевые слова:** алмаз, кимберлит, минеральные образования, спектроскопия, модифицирование, пульпа, электрохимическая обработка, извлечение.

**DOI:** dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.09.11

- в качестве механизма закрепления минеральных образований на поверхности алмазов принят процесс кристаллизации, интенсивность которого обусловлена в первую очередь вещественным составом кимберлитовых руд и условиями их переработки [9–12];

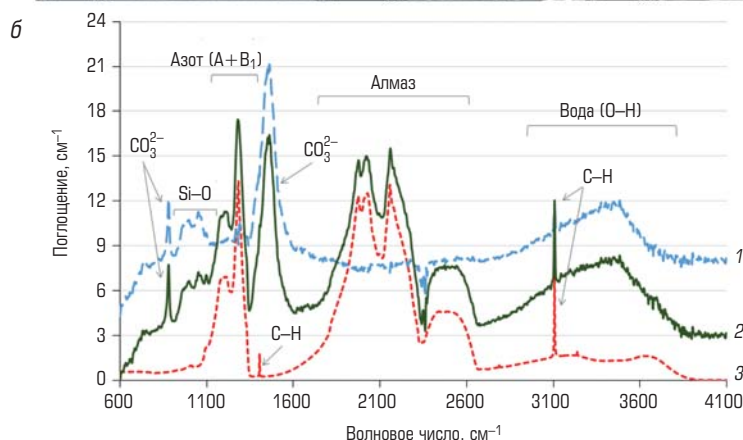
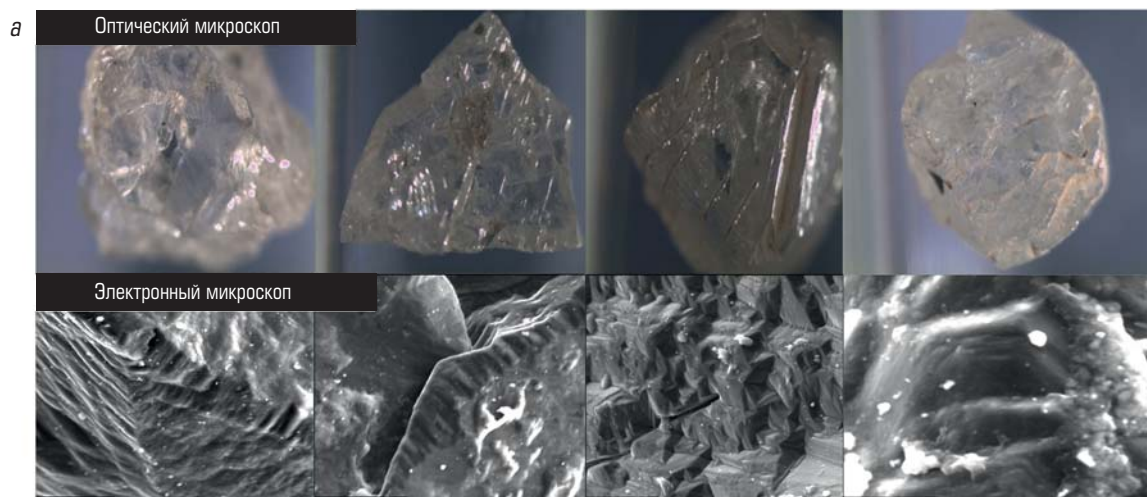
- состав минеральных образований на поверхности исследуемых алмазов, извлеченных из хвостов основных операций липкостной и пенной сепараций, идентичен составу измененных минералов перерабатываемых кимберлитовых руд и сформирован глинистыми тонкодисперсными минералами, представленными тальково-сметитовыми образованиями [10, 13, 14].

Таким образом, снижение потерь алмазов класса –5 мм в современных условиях вовлечения в переработку труднообогатимого алмазосодержащего сырья требует применения новых инновационных методов деструкции и растворения минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов для восстановления их природных свойств в соответствии с требованиями последующих технологических процессов сепарации.

Для решения поставленной задачи специалистами вышеуказанных организаций разработаны, экспериментально обоснованы и апробированы в промышленных условиях на объектах АК «АЛРОСА» высокоэффективные, экологически безопасные методы электрохимических воздействий на водные системы и рудную пульпу с целью разложения, растворения и последующего удаления с поверхности алмазных кристаллов примесей минерального происхождения.

В качестве предметов исследований изучены минеральные образования на алмазах, извлеченных из хвостов пенной сепарации труднообогатимых измененных кимберлитов, различных по глубине горизонтов, а также свойства поверхности

\* Работа выполнена в рамках проекта № 0138-2014-002 под научным руководством академика В. А. Чантурия.



**Рис. 1. Внешний вид рельефных минеральных образований на гидрофильной поверхности алмазов (а) и пример ИК-спектра (б) их исследований:**

1 — поглощение примазок; 2 — общий спектр поверхности алмаза; 3 — алмазное поглощение

кристаллов в условиях их обработки электрохимическими воздействиями.

Экспериментальная оценка поверхности извлеченных кристаллов в исследуемых условиях проведена с использованием методов оптической электронной микроскопии, ИК- и УФ-спектроскопии в лабораториях НИГП АК «АЛРОСА» под руководством О. Е. Ковальчука.

Оценка технологической эффективности разработанных технических решений для деструкции и растворения минеральных образований с поверхности алмазных кристаллов в процессах глубокой переработки труднообогатимых алмазосодержащих кимберлитов осуществлена посредством цикла стендовых и промышленных испытаний, выполненных в лаборатории института «Якутнипроалмаз» и в схеме пенной сепарации на ОФ № 3 Мирнинского ГОКа.

На **рис. 1** представлены фотографии алмазов, извлеченных из хвостовых продуктов пенной сепарации в процессе переработки измененных кимберлитовых руд, а также минеральные примеси на их поверхности, состав которых диагностирован методом инфракрасной спектроскопии.

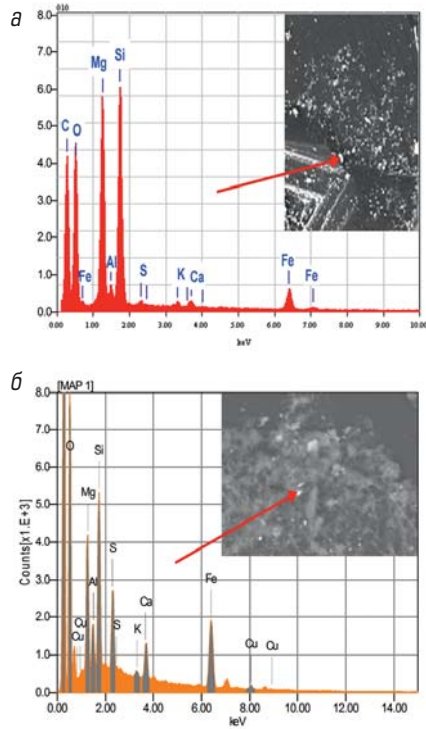
Исследование вещества на поверхности алмазов выполнено путем сравнения эталонных инфракрасных спектров пропускания слоистых минералов с полосами примазок на алмазах. Химический состав примазок определен методом микрорентгеноспектрального анализа.

На представленных фотографиях видно, что практически все исследуемые алмазы характеризуются наличием минеральных пленок на их поверхности, которые представляют собой слой тонкодисперсных глинистых минералов, расположенных в области различных дефектов плоскости кристаллов (см. рис. 1, а).

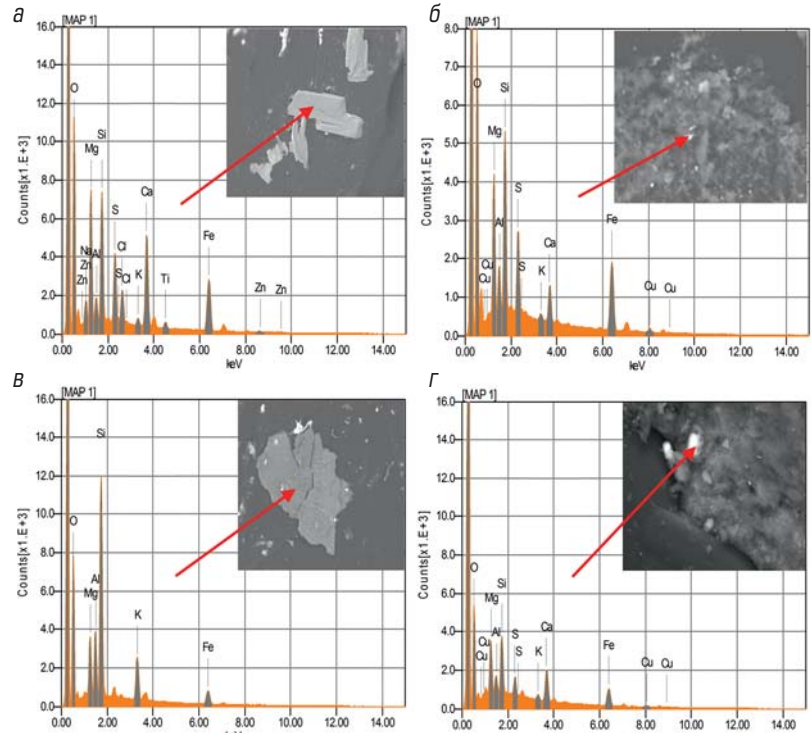
Приведенный на рис. 1, б ИК-спектр поверхности одного из исследуемых алмазов является типичным для основной массы изученных кристаллов.

Спектры ИК-поглощения основной массы исследуемых алмазов в диапазоне 1000–1200 см<sup>-1</sup> характеризуются наличием интенсивных полос в области 1000 и 500 см<sup>-1</sup>, которые являются характерными для групп [SiO<sub>4</sub>]<sup>4+</sup>. Слоистые силикаты определяются интенсивной полосой в области 1000 см<sup>-1</sup> и более слабыми полосами в области 1111 и 900 см<sup>-1</sup>.

Методом ИК-спектроскопии в минеральных примесях также зафиксирован кварц (линии 779 и 798 см<sup>-1</sup>). Широкая полоса 3413 см<sup>-1</sup> соответствует валентным колебаниям адсорбированной воды [15]. Присутствие карбонатных минералов диагностировано по характеристической полосе ИК-поглощения в области 1400–1500 см<sup>-1</sup>, соответствующей асимметричным валентным колебаниям CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> с максимумами 1455–1465 и 860–890 см<sup>-1</sup> [16]. Полоса валентных колебаний 1400–1500 см<sup>-1</sup> имеет асимметричный вид, что характерно для карбонатов серии кальцит-доломит. Методом инфракрасной спектроскопии также зафиксированы молекулы H<sub>2</sub>O, связи C<sub>алм</sub>-H, C-H<sub>2</sub>, C-H<sub>3</sub> и OH.



**Рис. 2. Фотографии и электронные спектры минеральных образований на поверхности алмазов, выделенных из измененных кимберлитов верхних (а) и глубоких (б) горизонтов**



**Рис. 3. Спектрограммы минеральных образований на поверхности алмазов:**  
 а — рельефное кальциево-магниевосиликатно-карбонатное образование;  
 б — шламовое кальциево-магниевосиликатно-карбонатное;  
 в — шламовое тальково-сметитовое;  
 г — шламовое серпентин-карбонатное

Таким образом, по характеру расположения линий Si–O и OH–ИК-спектров на поверхности исследуемых алмазов идентифицировано наличие силикатов, в том числе кварца и гипса, а также карбонатов.

С учетом ранее полученных данных [8, 10, 13, 14] проведен сравнительный анализ результатов исследования поверхности алмазов, отобранных из коллекций кристаллов, извлеченных из хвостов пенной сепарации кимберлитов верхних (рис. 2, а) и нижних (см. рис. 2, б) горизонтов одной из трубок Западной Яку-

тии, характеризующейся высокой степенью измененности основных кимберлитовых минералов.

Методом электронной спектроскопии на алмазах, не извлекаемых пенной сепарацией, диагностированы минеральные образования, характеризующиеся линейными размерами от 0,01 до 5 мм и толщиной от 5 до 350 мкм (рис. 3), и впервые представлена их классификация на четыре типа в зависимости от состава, свойств и способа закрепления на поверхности кристаллов (табл. 1).

**Таблица 1. Классификация минеральных образований на поверхности алмазов**

Тип поверхностного минерального образования	Толщина, мкм	Линейный размер, мм	Минеральный состав, %			
			Карбонаты	Гидроксид железа	Слоистые алюмосиликаты	Глины
1. Конгломерат (примазка) породных минералов на гидрофильной поверхности алмаза	20–280 145	0,01–1,5 0,44	4–16 8,8	0,5–1,9 0,91	21–42 29,6	46–75 54,4
2. Конгломерат (примазка) породных минералов на гидрофобной поверхности алмаза	20–280 145	0,01–1,5 0,44	3–14 7,3	0,1–1,5 0,73	42–82 59,6	16–28 21,5
3. Устойчивый сросток алмаза и породных минералов	20–350 198	0,03–3 0,88	23–74 47,1	1,5–6,5 3,72	12–22 17,1	6–18 10,8
4. Техногенное пленочное образование на поверхности алмаза	5–30 15,8	0,03–5 1,74	53–91 77,7	1,5–4,5 2,66	3–12 6,7	3–12 6,8

Примечание. В числителе — минимальное и максимальное значения величин, в знаменателе — среднее.

Таблица 2. Изменение состава поверхностной пленки на алмазах после обработки продуктами электролиза воды

Степень гидрофобности, %	Содержание, % (ат.)				$\Sigma_{\text{минеральных примесей}}/C_{\text{алм}}$	Площадь пленки, %
	C <sub>алм</sub>	Si	Fe	Mg		
<i>I — гидрофильные алмазы</i>						
13,2	57,5	5,2	6,3	6,5	0,30	83,2
<i>II — гидрофобные алмазы (после обработки продуктами электролиза воды)</i>						
89,7	85,3	1,1	0,4	1,5	0,034	14,9

В изученных коллекциях минеральные образования представлены в основном полиминеральными макрообразованиями кальциево-магниево-силикатно-карбонатного состава, полирельефными шламовыми покрытиями кальциево-магниево-силикатно-карбонатного состава и шламовыми примазками тальково-сметитового состава. Практически во всех минеральных образованиях диагностируется железо.

Таким образом, комплексом аналитических исследований доказано, что в процессах переработки измененных кимберлитов различных горизонтов кристаллы алмазов, не извлекаемые методом пенной сепарации, в общем случае имеют неоднородную поверхность с минеральными образованиями, представленными магниевыми силикатами, карбонатами кальция, магния и железа. Однако при этом количество, размер, условия и прочность закрепления диагностируемых минеральных образований различны и обусловлены степенью изменения перерабатываемых кимберлитовых руд.

С учетом известных и ранее полученных данных [9–12], а также результатов выполненного комплекса исследований в качестве основных составляющих в системе образования на поверхности алмазных кристаллов минеральных примесей приняты их площадь, толщина и прочность закрепления.

Для установления условий осаждения и закрепления на поверхности алмазов минеральных образований с целью обоснования метода их деструкции и растворения выполнен термодинамический анализ устойчивости основных диагностируемых минералов в исследуемых условиях. Методика термодинамического моделирования соответствовала применяемой для расчета диаграмм стабильности [17, 18]. В расчетных уравнениях использованы реальные ионные концентрации, определенные в жидкой фазе исследуемых процессов при ранее выполненных исследованиях [10].

Термодинамический анализ химических реакций с участием минералов, образующих гидрофильные пленки на алмазах, выполнен методом построения диаграмм стабильных соединений в координатах  $\lg[CO_3] - pH$ . В результате анализа установлено:

- в оборотной воде и жидкой фазе пульпы в исследуемых условиях с наименьшей вероятностью происходит образование магнетита и гидрокарбоната магния, а наиболее устойчивыми являются смешанные карбонаты кальция, магния, железа; при этом практически во всех условиях выявлено образование доломита, сидерита и гидроксида железа;
- для разложения (растворения) карбонатных и гидроксидкарбонатных осадков на поверхности алмазных кристаллов основным условием является снижение концентрации бикарбонатных ионов и смещение pH используемой водной системы в кислую область.

С учетом выявленных структурно-химических особенностей тонкодисперсных минеральных примесей на поверхности исследуемых алмазов, а также механизма их образования и закрепления как процесса кристаллизации предложен метод деструкции и растворения пленок на основе применения продуктов электролиза водных си-

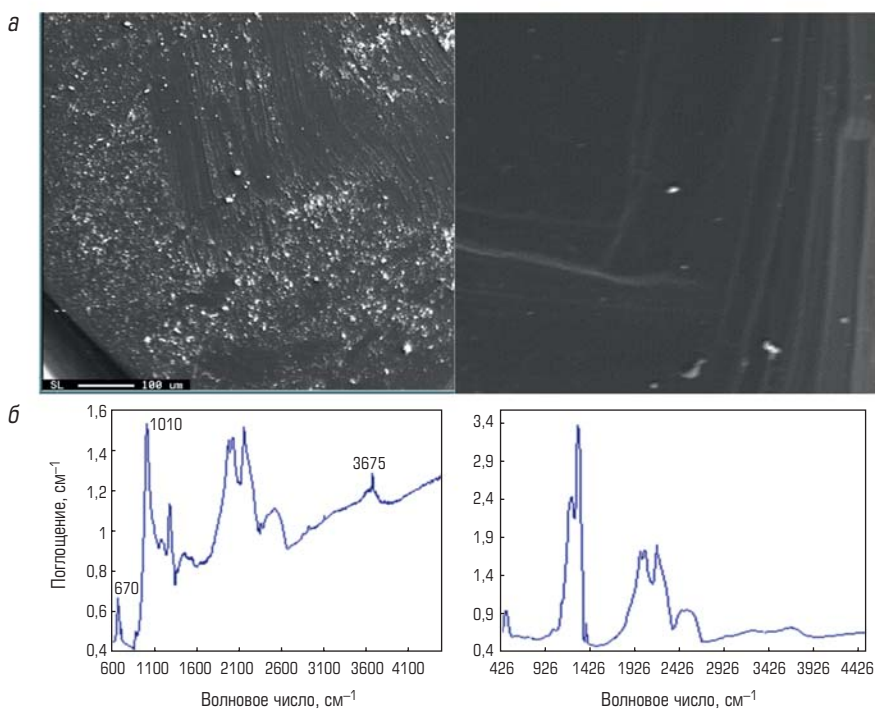


Рис. 4. Поверхность алмаза с минеральными образованиями (слева) и после их деструкции продуктами электролиза воды (справа), диагностированная методами электронной микроскопии (а) и ИК-спектроскопии (б)

Таблица 3. Зависимости краевого угла смачивания алмазов  $\gamma$ , градус, от массовой доли элементов  $x$  в поверхностном слое

Массовая доля элемента $x$	Уравнение связи	Величина коэффициента $R_2$
Углерод	$y = -0,4x^2 + 10,8x + 56,5$	97,5
Кислород	$y = -1,3x^2 + 0,6x + 102,1$	94,3
Суммарная массовая доля минеральных примесей	$y = -0,5x^2 - 6,4x + 121$	96,4

стем, ранее апробированных в качестве реагентов-активаторов, позволяющих восстановить природную гидрофобность поверхности алмазов [8, 10, 13, 14].

Экспериментальная оценка эффективности применения электрохимически обработанных водных систем для создания условий деструкции и растворения минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов проведена на коллекциях природных алмазов измененных кимберлитов глубоких горизонтов. С учетом результатов исследований, проведенных для условий переработки кимберлитовых руд верхних горизонтов [8, 10], в экспериментах использованы продукты бездиафрагменной обработки минерализованной оборотной воды, характеризующиеся изменением величины  $E_h$  от +650 до +900 мВ при интервалах значений рН от 5,8 до 6,8.

Механизм действия метода электрохимического кондиционирования обеспечивает модификацию свойств водных систем до показателей, соответствующих результатам термодинамических расчетов за счет:

- преобладания реакций разложения хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов;
- первоначального увеличения концентрации хлора в продуктах электролиза с их подщелачиванием и последующего подкисления вследствие нарастания скорости реакций окисления воды газообразным хлором.

По результатам выполненных экспериментов (табл. 2) установлена возможность снижения содержания примесных элементов и площади бронирующей пленки с 83 до 15 % на поверхности алмазов в результате их обработки продуктами бездиафрагменного электролиза минерализованных водных систем.

Полученные экспериментальные данные подтверждены аналитическими методами диагностирования поверхности алмазных кристаллов в исследуемых условиях (рис. 4).

Фотографии, полученные методом электронной микроскопии, а также характер ИК-спектров поверхности кристаллов убедительно демонстрируют эффективность применения продуктов электролиза водных систем для удаления с поверхности алмазов гидрофильных минеральных примесей.

Стендовые испытания пенной сепарации, проведенные в лаборатории института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» с использованием опытного сепаратора и неизвлекаемых алмазных кристаллов кимберлитов трубки «Интернациональная», позволили

установить повышение с 10 до 68,9 % извлечения алмазов при подаче электрохимически обработанной оборотной воды в процесс флотации.

Результатами промышленных испытаний, проведенных в схеме пенной сепарации ОФ № 3 Михайловского ГОКа и подтвержденных соответствующими актами, установлено, что использование электрохимически обработанной оборотной воды в процессе флотации труднообогатимых алмазосодержащих кимберлитов трубок «Мир» и «Интернациональная» позволяет повысить извлечение алмазов в концентрат пенной сепарации на 5,2 и 23,5 % соответственно.

Данные статистического анализа, приведенные в табл. 3, показали, что имеет место устойчивая корреляционная связь между гидрофобностью алмаза и отдельными параметрами состава поверхности, близкая к прямо пропорциональной зависимости.

### Выводы

Таким образом, в результате аналитических, термодинамических и технологических исследований сделаны следующие основные выводы.

1. Гидрофильные кристаллы алмазов имеют нарушенную неоднородную поверхность с распространенными рельефными минеральными образованиями, генетически родственными измененной кимберлитовой породе и представленными магниевыми силикатами, карбонатами кальция, магния и железа.

2. Впервые на поверхности природных алмазов классифицированы минеральные образования, имеющие различное происхождение и свойства:

- остатки породы, сохранившейся на кристаллах алмаза и имеющей с ними общий генезис;
- адгезионно закрепившиеся на гидрофильной или гидрофобной поверхности алмаза конгломераты (примазки) и единичные зерна шламовых классов гидрофильных или гидрофобных минералов;
- пленочные продукты процессов кристаллизации солеобразных минералов из минерализованных технологических водных систем.

3. Подтверждена эффективность применения электрохимически модифицированных водных систем для деструкции и растворения минеральных образований на поверхности природных алмазов как верхних, так и глубоких горизонтов труднообогатимых измененных кимберлитовых руд.

Библиографический список

1. Чантурия В. А., Горячев Б. Е. Обогащение алмазосодержащих кимберлитов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья / под. ред. В. А. Чантурия. — М.: ИД «Руда и Металлы», 2008. С. 151–163.
2. Горячев Б. Е. Технология алмазосодержащих руд. — М.: МИСиС, 2010. — 326 с.
3. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е. Поверхностные свойства алмазов метасоматически измененных кимберлитов и их модификация в условиях переработки минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 2. С. 137–148.
4. Кулакова И. И. Химия поверхности наноалмазов // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 4. С. 621–628.
5. Krueger A. The chemistry of nanodiamond // Rsc nanoscience and nanotechnology. 2014, January. No. 31. P. 49–88.
6. Mochalin V. N., Gogotsi Y., Shenderova O., Ho D. The properties and applications of nanodiamonds // Nature nanotechnology. 2012. No. 1. P. 11–23.
7. Коваленко Е. Г. Обоснование и выбор удаления минеральных пленок с поверхности алмазов при тепловой обработке // Мат-лы междунар. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург, 23–24 апреля 2014 г. С. 170–173.
8. Двойченкова Г. П., Миненко В. Г., Ковальчук О. Е., Островская Г. Х., Коваленко Е. Г. Интенсификация процесса пенной сепарации алмазосодержащего сырья на основе электрохимического метода газонасыщения водных систем // Горный журнал. 2012. № 12. С. 88–93.
9. Стрикленд-Констэбл Р. Ф. Кинетика и механизм кристаллизации: пер. с англ. — Л.: Недра, 1971. — 310 с.
10. Двойченкова Г. П. Формирование минеральных образований на поверхности природ-

- ных алмазов и метод их деструкции на основе электрохимически модифицированных минерализованных вод // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 4. С. 159–171.
11. Максимовский Е. А., Файнер Н. И., Косинова М. Л., Румянцев Ю. М. Исследование структуры тонких нанокристаллических пленок // Журнал структурной химии. 2004. Т. 45. С. 61–65.
12. Li D., Qin Q. H., Stachurski Z., Zuo D., Lu W., Boswell R. W. Nanocrystalline diamond thin films synthesis on curved surface // Plasma chemistry and plasma processing. 2014. No. 4. P. 767–784.
13. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е., Тимофеев А. С. Особенности состава поверхности гидрофильных алмазов и их роль в процессе пенной сепарации // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 6. С. 173–181.
14. Chanturia V. A., Bogachev V. I., Trofimova E. A., Dvoichenkova G. P. Mechanism and efficiency of water-based removal of grease from diamonds during grease separation // Journal of mining science. 2012. No. 3. P. 559–564.
15. Rossman G. R. Vibrational spectroscopy of hydrous components // Reviews in Mineralogy. Min. Soc. America. Washington. D. C. Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology. 1988. Vol. 18. P. 193–206.
16. McMillan P. F., Hofmeister A. M. Infrared and Raman spectroscopy // Reviews in Mineralogy. Min. Soc. America. Washington. D. C. Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology. 1988. Vol. 18. P. 99–159.
17. Гаррелс Ч., Крайст Г. Растворы, минералы, равновесия. — М.: Мир, 1967. — 407 с.
18. Наумов Г. Б., Руженко Б. Н., Ходаковский И. Л. Справочник термодинамических величин. — М.: Атомиздат, 1971. — 240 с. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 9, pp. 53–58  
DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.09.11

High-level processing intensification based on electrochemical treatment of rebellious diamond ore

Information about author

G. P. Dvoychenkova<sup>1</sup>, Professor, Candidate of Engineering Sciences, dvoigp@mail.ru

<sup>1</sup> Mirny Polytechnic Institute (branch), Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Abstract

One of the causes for the decline in the diamond ore processing performance is alteration of surface properties of diamonds under action of exogenous and supergene processes that lead to formation of mineral films on the surface of crystals.

High variability of kimberlites associated with the content of secondary minerals results in reduced recovery of diamonds in sticky and foam separation to 80%, whereas extraction of diamonds from low metamorphic grade kimberlites makes 80–90%.

The package of analytical and experimental investigations has proved that hydrophilic diamond crystals unrecoverable in sticky and foam separation have an impaired heterogeneous surface with widespread relief mineral formations caused by the rate of alteration of kimberlites and represented by magnesium silicates, calcium carbonates, magnesium and iron, that form a mechanically strong aggregate on the diamond surface.

In some cases, the surface of diamonds is mosaically covered by micro- and macro-size mineral compounds of serpentine-talc type with the high mass fraction of iron.

On the basis of thermodynamic calculations, dissolvability of the mineral formations on the diamond surface after modification of physicochemical properties of liquid phase of ore pulp is estimated.

A promising way to increasing efficiency of diamond-bearing kimberlite processing is the combination of physical and physicochemical treatment of solid and liquid phase of the slurry in order to lower the rate of coating of the diamond surface with mineral formations, or to ensure the diamond surface clearing.

The theoretical and experimental investigations have confirmed the effectiveness of the electrochemical conditioning of circulating water in sticky and foam separation circuits to increase the recovery of diamonds subjected to the intense surface changes.

It is shown that the application of the electrochemical conditioning of circulating water in flotation of rebellious diamond ores allows clearing diamonds surface from hydrophilic mineral formations and, consequently, increasing diamond recovery in foam separation concentrate by 5.2% in case of weakly modified kimberlites and by 23.5% in case of heavily modified kimberlites.

This study has been accomplished in the framework of Project No. 0138-2014-002 under scientific guidance of Academician V. A. Chanturia.

**Keywords:** diamond, kimberlite, mineral formation, spectroscopy, modification, slurry, electrochemical treatment, recovery.

References

1. Chanturia V. A., Goryachev B. E. Concentration of diamond-bearing kimberlites. Progressive technologies of complex processing of mineral raw materials. Under the editorship of

- V. A. Chanturia. Moscow: «Ore and Metals» Publishing House, 2008. pp. 151–163.
- Goryachev B. E. Technology of diamond-bearing ores. Moscow: MISIS, 2010. 326 p.
- Chanturia V. A., Dvoychenkova G. P., Kovalchuk O. E. Surface properties of diamonds recovered from metasomatically modified kimberlites during processing. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015. No. 2. pp. 137–148.
- Kulakova I. I. Surface chemistry of nanodiamonds. *Fizika tverdogo tela*. 2004. Vol. 46, Iss. 4. pp. 621–628.
- Krueger A. The chemistry of nanodiamond. *Rsc nanoscience and nanotechnology*. 2014. January, No. 31. p. 49–88.
- Mochalin V. N., Gogotsi Y., Shenderova O., Ho D. The properties and applications of nanodiamonds. *Nature nanotechnology*. 2012. Vol. 7, No.1. p. 11–23.
- Kovalenko E. G. Substantiation and choice of mineral films removal from diamond surface during the thermal treatment. *Scientific basis and practice of processing of ores and technogenic raw materials: materials of international conference, Ekaterinburg, April 23–24, 2014*. pp. 170–173.
- Dvoychenkova G. P., Minenko V. G., Kovalchuk O. E., Ostrovskaya G. Kh., Kovalenko E. G. Intensification process of diamond-containing raw materials, on the basis of electrochemical method of gas saturation of water systems. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 12. pp. 88–93.
- Strickland-Constable R. F. Kinetics and Mechanisms of Crystallization. Translated form English. Leningrad: Nedra, 1971. 310 p.
- Dvoychenkova G. P. Mineral formations on natural diamond surface and their destruction using electrochemically modified mineralized water. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 4. pp. 159–171.
- Maksimovskiy E. A., Fayner N. I., Kosinova M. L., Rumyantsev Yu. M. Study of the structure of thin nanocrystalline films. *Zhurnal strukturnoy khimii*. 2004. Vol. 45. pp. 61–65.
- Li D., Qin Q. H., Stachurski Z., Zuo D., Lu W., Boswell R. W. Nanocrystalline diamond thin films synthesis on curved surface. *Plasma chemistry and plasma processing*. 2014. No. 4. pp. 767–784.
- Chanturia V. A., Dvoychenkova G. P., Kovalchuk O. E., Timofeev A. S. Surface composition and role of hydrophilic diamonds in foam separation. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015. No. 6. pp. 173–181.
- Chanturia V. A., Bogachev V. I., Trofimova E. A., Dvoichenkova G. P. Mechanism and efficiency of water-based removal of grease from diamonds during grease separation. *Journal of Mining Science*. 2012. No. 3. pp. 559–564.
- Rossman G. R. Vibrational spectroscopy of hydrous components. Spectroscopic methods in mineralogy and geology. *Reviews in mineralogy*. No. 18. Mineralogical Society of America, Washington, D. C., 1988. pp. 193–206.
- McMillan P. F., Hofmeister A. M. Infrared and Raman spectroscopy. Spectroscopic methods in mineralogy and geology. *Reviews in mineralogy*. No. 18. Mineralogical Society of America, Washington, D. C., 1988. Vol. 18. pp. 99–159.
- Robert M. Garrels, Charles L. Christ. Solutions, Minerals and Equilibria. Moscow: Mir, 1967. 407 p.
- Naumov G. B., Ruzhenko B. N., Khodakovskiy I. L. Thermodynamic values reference book. Moscow: Atomizdat, 1971. 240 p.