

6. Durove Zh. V., Khizh Zh. Prognosis and effective prevention of rock bursts in underground coal mines in Slovakia. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012. Vol. 198. pp. 166–172.
7. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G. Acoustic and Electromagnetic Emissions as Precursor Phenomena in Failure Processes. *International Journal for Experimental Mechanics*. 2011. Vol. 47. pp. 144–152.
8. Aker E., Kühn D., Vavryčuk V., Soldal M., Oye V. Experimental investigation of acoustic emissions and their moment tensors in rock during failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 70. pp. 286–295.
9. Kabwe E., Wang Y. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2015. Vol. 5. pp. 104–121.
10. Kaiser P. K., Cai M. Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 4(3). pp. 215–227.
11. Viktorov S. D., Kochanov A. N. Evaluation of conditions of formation and size of microparticles with devastating impacts on rock samples. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. Vol. 18, Iss. 4. pp. 1685–1686.
12. Viktorov S. D., Kochanov A. N., Odintsev V. N., Osokin A. A. Emission of submicron particles upon rock deformation. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2012. Vol. 76. pp. 388–390.
13. Kudryashov V. V., Viktorov S. D., Kochanov A. N. On particle size distribution in rocks under failure. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2006. No. 6. pp. 68–72.
14. Odintsev V. N. Detachable fragmentation of rocks. Moscow: IPKON RAN, 1996. 166 p.
15. Massalimov I. A., Urakaev F. Kh. Possibility of formation of nanosized particles in the fissure sock. *Physicochemistry of ultradispersed (nano) systems: collection of proceedings*. Moscow: MIFI, 2002. pp. 46–47.
16. Kuznetsov S. V., Odintsev V. N., Slonim M. E., Trofimov V. A. Methodology of calculation of rock pressure. Moscow: Nauka, 1981. 104 p.
17. Lee M., Haimson B. Laboratory Study of Borehole Breakouts in Lac du Bonnet Granite: a Case of Extensive Failure Mechanism. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 1993. Vol. 30, Iss. 7. pp. 1039–1045.

УДК 622.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СОСТАВА КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД И МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ*



Г. П. ДВОЙЧЕНКОВА,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук,
dvoigp@mail.ru,
ИПКОН РАН,
Москва, Россия



О. Е. КОВАЛЬЧУК,
главный инженер,
Научно-исследовательское
геологоразведочное
предприятие АК «АЛРОСА»
(ПАО), Мирный, Россия



Ю. А. ПОДКАМЕННЫЙ,
инженер



А. С. ТИМОФЕЕВ,
младший научный сотрудник

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Методами электронной микроскопии, ИК-спектроскопии диагностированы минеральные компоненты в составе исходных кимберлитов и на поверхности алмазов. Установлены механизм и последовательность формирования минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов. Впервые выполнена их систематизация и классификация.

Ключевые слова: алмаз, кимберлит, минеральные образования, спектроскопия, модифицирование, шламы, примеси.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.09

Введение

Высокое содержание алмазов крупностью –5 мм в кимберлитовых рудах Западной Якутии обуславливает необходимую глубину их переработки по классу 0,5 мм и менее [1–3]. Извлечение алмазов данного класса крупности осуществляется процессами липкостной и пенной сепарации, а также пленочной флотации, при которых используются природные гидрофобные свойства извлекаемых кристаллов и предъявляются в соответствии с этим повышенные требования к чистоте их поверхности.

Опытом работы обогатительных фабрик и результатами исследований ряда авторов установлено, что высокая степень измененности кимберлитов, связанная с содержанием до 90 % вторичных минералов, приводит к снижению до 40 % извлечения из них алмазов процессами липкостной и пенной сепарации. При этом из кимберлитов с низкой степенью метаморфизма и содержанием вторичных минералов менее 50 % извлечение алмазов

* Работа выполнена в рамках плана НИР ИПКОН РАН № 0138-2014-0002 при поддержке научной школы НШ 74820145 под руководством академика РАН В. А. Чантурия.

составляет более 90 % [4]. Исследованиями кристаллов, не извлекаемых вышеуказанными процессами, установлено, что первичные и техногенные минеральные образования на природных алмазах приводят к гидрофилизации их поверхности, ослаблению ее контакта с реагентами и воздушными пузырьками и, соответственно, снижению извлечения алмазных кристаллов физико-химическими методами сепарации [5–7].

Вовлечение в промышленную переработку техногенных скоплений и труднообогатимых кимберлитовых руд, характеризующихся за счет активных вторичных изменений интенсивной серпентинизацией и карбонатизацией, а также развитием ряда гидротермальных минералов, отрицательно влияет на технологические показатели вышеуказанных физико-химических процессов сепарации алмазосодержащего сырья [8–11]. Высокое содержание измененных минералов в кимберлитовых рудах приводит к образованию на поверхности кристаллов гидрофильных пленок, которые снижают степень гидрофобности алмазов и увеличивают их потери в процессах липкостной и пенной сепарации до 20–30 % [2, 4].

Увеличение переработки интенсивно измененных кимберлитовых пород связано с решением крупной научно-технической проблемы формирования физико-химических основ инновационных процессов повышения контрастности технологических свойств алмазов и породообразующих минералов в процессах обогащения алмазоносных пород.

Цель исследований, проведенных авторами статьи, заключалась в выявлении взаимосвязи между составом кимберлитовых руд и закономерностями формирования минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов, а также в систематизации и классификации этих образований, что необходимо для обоснования и разработки эффективных методов восстановления гидрофобных свойств алмазов в таких процессах, как липкостная, пенная сепарации и пленочная флотация.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Для изучения механизма и закономерностей процесса формирования поверхностных образований на алмазах в качестве предметов исследований приняты интенсивно измененные кимберлиты различного вещественного состава и минеральные образования на поверхности алмазных кристаллов, извлеченных из продуктов их переработки.

Количественный минеральный состав образцов кимберлита и структурные особенности слоистых минералов изучены с использованием методов электронной микроскопии (Jeol-5610, Jeol-8800), микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатор JXA-8800R), рентгеновской дифракции (дифрактометр X'tra-155), рентгенофлуоресцентной микроскопии (Horiba XGT 7200), инфракрасной микроскопии (Bruker Hyperion 2000, 3000) и термографических методов.

Исследование примесей на поверхности алмазов выполнено методами оптической микроскопии, рентгенофлуоресцентной и инфракрасной спектроскопии и микрорентгеноспектрального ана-

лиза. Химический состав минеральных примесей определен с использованием микроанализатора JXA-8800R.

Эксперименты выполнены в лабораториях ИПКОН РАН, института «Якутнипроалмаз» и НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) в четыре этапа. На первом этапе изучены образцы труднообогатимых кимберлитовых руд, поступающих в технологический процесс переработки. Глинистые минералы исследуемых кимберлитов дополнительно диагностированы по изменению дифрактограмм, полученных в условиях последовательного использования препаратов в естественном состоянии, при насыщении глицерином и в условиях прокалывания при температуре 550 °С. На втором этапе изучен минералогический состав отобранных из технологических процессов переработки тонкодисперсных шламов рассматриваемых труднообогатимых кимберлитовых руд. На третьем этапе исследований изучены состав примесей на поверхности алмазов и закономерности процессов их образования в условиях переработки исследуемых кимберлитов. На четвертом этапе проведена систематизация и классификация минеральных образований, диагностированных на поверхности природных алмазных кристаллов.

Результаты изучения микроскопических исследований кимберлитовых аншлифов исследуемых проб показали, что образцы преимущественно характеризуются неоднородной текстурой цемента с единичными микролитами кальцита, зерен апатита и редких иголок (0,15 мм) хлоритизированного флогопита. Карбонат и тальк отмечены в виде прожилков в серпентине и в виде тонкой каймы, подчеркивающих форму вкрапленника. Карбонатная матрица состоит из микрозернистого кальцита и доломита.

Петрографическими и рентгенографическими исследованиями образцов кимберлита выявлено высокое (до 90 %) содержание глинистых минералов, образованных в результате преобразования серпентина и представленных тальком, сепиолитом, слюдой, серпентином, смешанослойными образованиями тальк-сапонита и хлорит-сапонита. Диагностированы глинистые минералы со смектитовыми пакетами: Na-, тальк- и хлорит-сапониты, которые являются источником образования гидрофильных пленок на поверхности алмазных кристаллов. Карбонатная составляющая исследуемых образцов кимберлитов определена как кальцит-доломитовая формация, силикатная – серпентином, сапонитом и тальком.

Кристаллы минералов имеют размер 0,001–0,01 мкм и являются наночастицами с высокоразвитой поверхностью, обладающими уникальными электрическими, термодинамическими, механическими и химическими свойствами [11, 12]. Малая интенсивность дифракционных линий указывает на высокое содержание рентгеноаморфных частиц, создающих основные проблемы в процессах извлечения алмазных кристаллов физико-химическими методами сепарации [13, 14].

Для определения генезиса минеральных образований на алмазах проведены дополнительные исследования шламовых продуктов, отобранных в процессах переработки рассматриваемых кимберлитовых руд. На основе изучения и анализа проб шламов из продуктов обогащения кимберлитовых руд методами РФ- и ИК-спектроскопии диагностирован их минеральный состав в виде серпентина, хлорита, талька и смектита при содержании 50 %

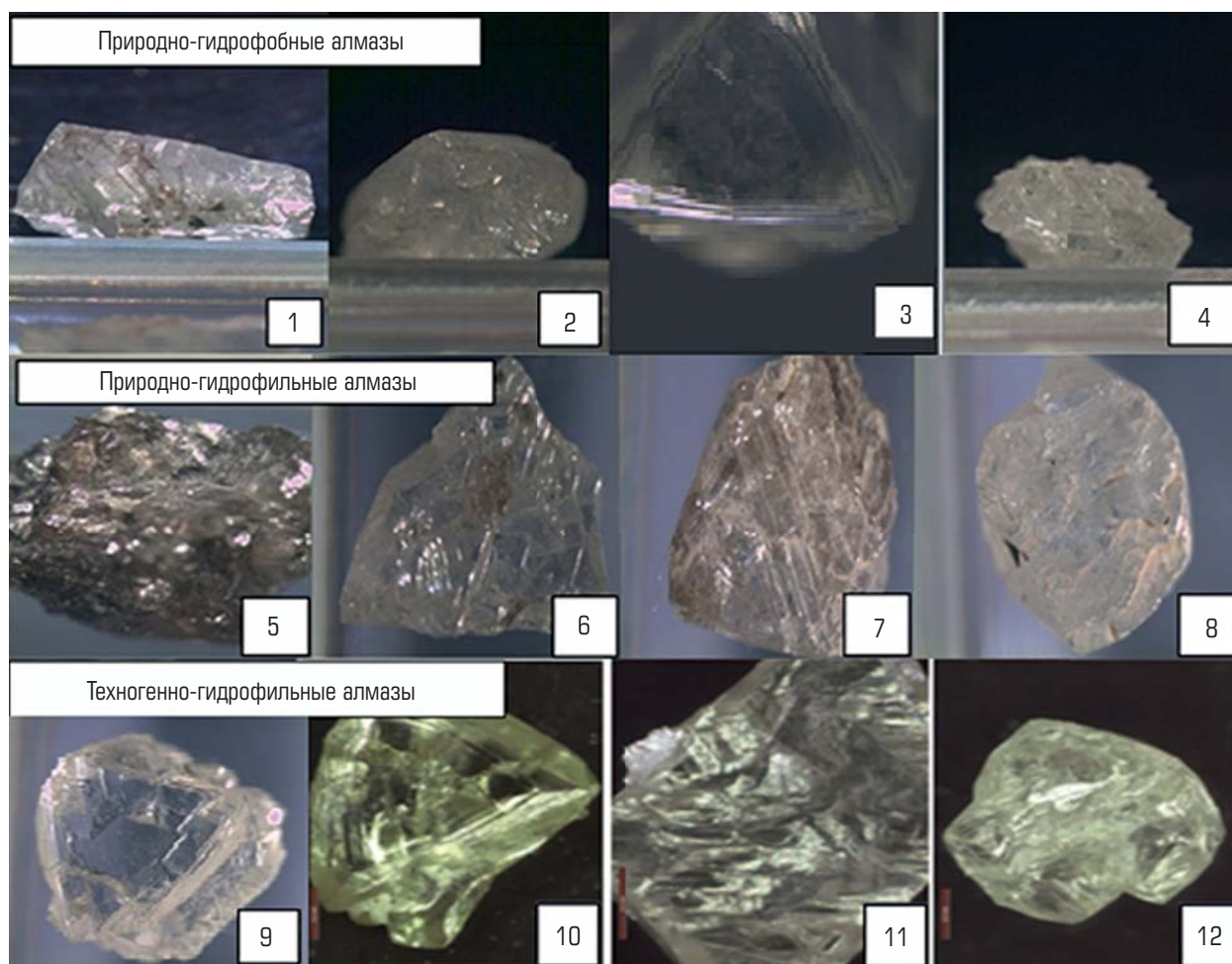


Рис. 1. Внешний вид алмазных кристаллов (1–12 – номера образцов)

тонкодисперсной рентгеноаморфной фазы. Кроме того, установлено присутствие небольших содержаний карбонатных пород – кальцита и доломита.

Таким образом, на основе анализа результатов комплексных структурно-минералогических исследований первых этапов подтверждена идентичность минерального состава измененных труднообогатимых кимберлитов и образованных в процессах их переработки тонкодисперсных шламов. Установлено, что характерной особенностью изученных минеральных объектов является наличие высокого процента рентгеноаморфных фаз, обладающих способностью образовывать гидрофильные пленки на поверхности кристаллов алмазов и, соответственно, обуславливать увеличение потерь алмазов с хвостами рассматриваемых физико-химических процессов сепарации.

Задача очередного этапа исследований состояла в определении особенностей состава минеральных образований на поверхности исследуемых алмазов с целью выявления условий их формирования и закрепления для последующей систематизации и классификации [15].

Для создания экспериментальной коллекции из общей массы кристаллов отбирали алмазы, на поверхности которых минеральные образования отличались как по структуре, так и по площади

распространения (рис. 1). Перед проведением экспериментальных исследований алмазные кристаллы были рассортированы на следующие группы:

- природно-гидрофобные кристаллы, в том числе не содержащие на поверхности минеральных образований (см. рис. 1, кристаллы 2 и 4) и с незначительным количеством минеральных образований на поверхности (см. рис. 1, кристаллы 1 и 3);
- природно-гидрофильные кристаллы, поверхность которых покрыта плотными минеральными образованиями (см. рис. 1, кристаллы 5–8);
- техногенно-гидрофильные кристаллы, извлеченные из хвостов пенной сепарации исследуемых кимберлитов (см. рис. 1, кристаллы 9–12).

На представленных фотографиях (см. рис. 1) видно, что практически все исследуемые кристаллы характеризуются наличием минеральных пленок на их поверхности, которые располагаются как на плоскости кристаллов, так и в области различных дефектов их поверхности.

Результаты программного анализа полученных ИК-спектров поверхностей исследуемых алмазов указывают на преобладание в составе рельефных минеральных образований силикатных минералов. Обнаруженные образования представлены тремя груп-

пами: макрообразования толщиной до десятков микрон; микрообразования толщиной от 10 до 100 нм; пленки толщиной до 150 нм (рис. 2).

Анализ характера распределения поверхностных минеральных образований на алмазах позволяет в качестве наиболее вероятного механизма их образования принять процесс кристаллизации в условиях пресыщения [4, 14, 16], т. е. в условиях превышения фактической концентрации кристаллизующегося вещества над равновесной концентрацией в растворе. В рассматриваемом случае поверхность алмаза служит матрицей, формирующей фазу кристаллизующейся соли. В качестве критерия активности поверхности (подложки) используется значение величины кристаллографического несоответствия [4, 12, 16, 17]:

$$\delta = |a_{sf} - a_{cr}|/a_{cr},$$

где a_{sf} – параметр кристаллической решетки подложки; a_{cr} – параметр кристаллической решетки кристаллизующегося вещества.

Образование и рост зародышей кристалла происходят тогда, когда параметры указанных кристаллических решеток отличаются не более чем на 20 % ($\delta = 0,2$) [18].

Для подтверждения взаимосвязи состава кимберлитов и минеральных примесей на алмазах, а также гипотезы о процессе кристаллизации как основного механизма их формирования, на поверхности кристаллов дополнительно в качестве предметов

исследований изучены отобранные сотрудниками НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) по специальной методике образцы пробы измененных кимберлитовых пород и алмазные кристаллы, извлеченные из продуктов их переработки.

Исследование состава вторичных минеральных образований проводили путем сравнения эталонных инфракрасных спектров пропускания слоистых минералов с полосами примесей на алмазах. Химический состав исследуемых объектов определяли методом микрорентгеноспектрального анализа с использованием микроанализатора JXA-8800R в Центральной аналитической лаборатории Ботубинской геолого-разведочной экспедиции (ЦАЛ БГРЭ) АК «АЛРОСА» (ПАО). Распределение элементов в минеральных образованиях изучено с использованием специальной программы анализатора INCA.

Электронное изображение интенсивно измененных образцов кимберлитовой породы (а, б) и извлеченных из них алмазов (в, г) представлено на рис. 3.

Исследуемые кимберлиты характеризуются метаморфозой гётита и кальцита по оливину; основная связующая масса представленных образцов состоит из серпентина и хлорита с множеством мелкодисперсных гидрослюдовых фаз, смешанослойных образований и глинистых минералов иллитовой группы.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что в исследуемых образцах кимберлитов главными пороодообра-

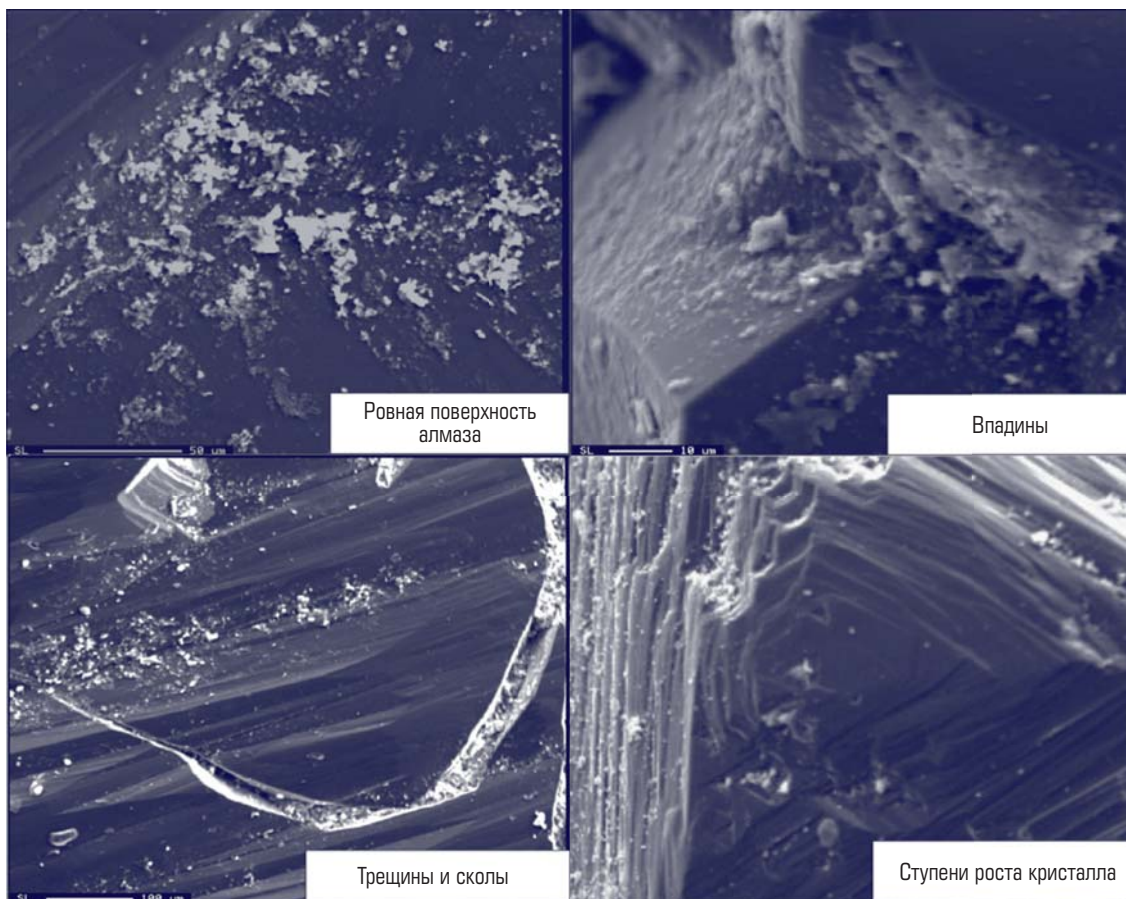


Рис. 2. Внешний вид минеральных примесей на поверхности исследуемых алмазов

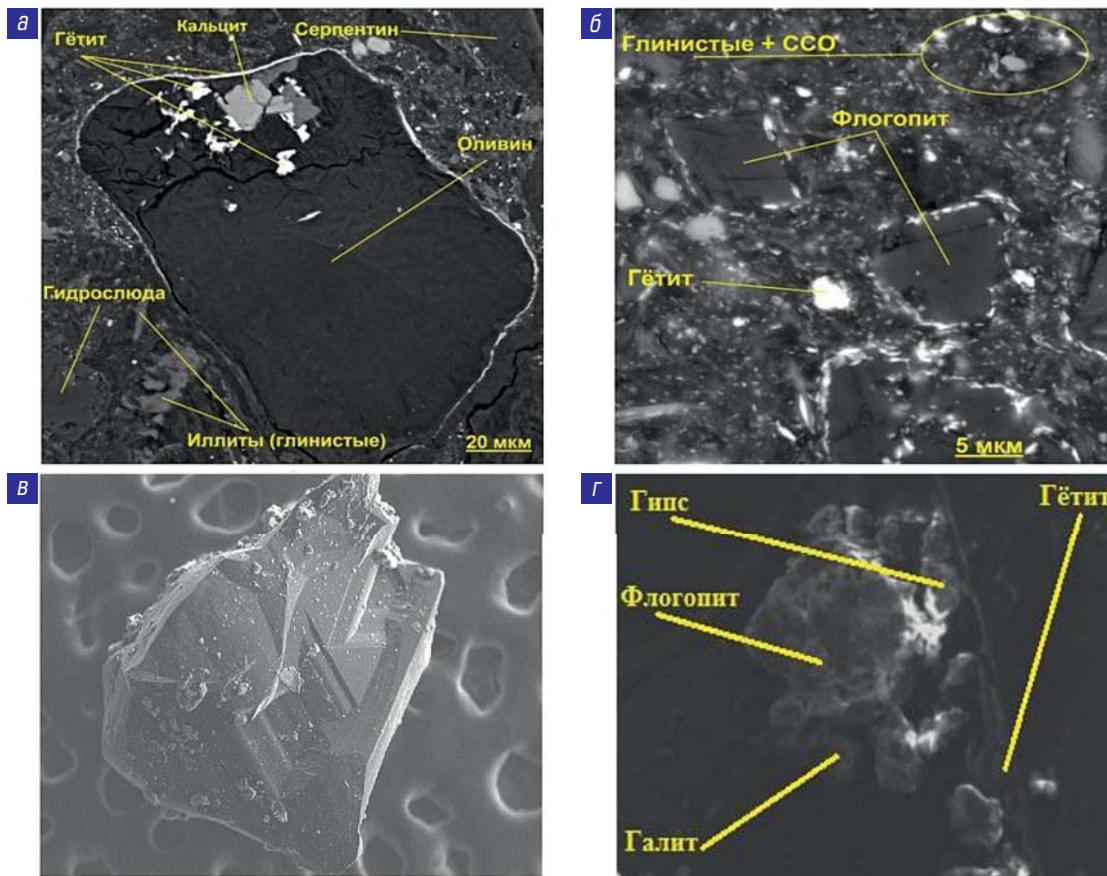


Рис. 3. Электронное изображение интенсивно измененных кимберлитовых руд и поверхности извлеченного из них алмаза:
а – участок кимберлитовой породы с метаморфозой гётита и кальцита по оливину; *б* – участок кимберлитовой породы, содержащий минералы флогопита и гётита; *в* – общий вид извлеченного алмаза; *г* – изображение минерального образования на поверхности алмаза

зующими минералами являются серпентин и кальцит, а также достаточно широко распространены и другие первичные и вторичные алюмосиликатные и карбонатные минералы, гидроксиды и оксиды железа, солеобразные минералы.

Минералы, наиболее часто диагностированные на поверхности алмазов в условиях проведения эксперимента, представлены в **табл. 1**.

В соответствии с принятой гипотезой формирования минеральных примесей и согласно кристаллографическому несоответ-

ствию решетки гётита и решетки алмаза ($\delta(c) = 0,15$), данный минерал может кристаллизоваться на поверхности алмазного кристалла и быть подложкой для кристаллизации остальных диагностированных минералов в последовательности «алмаз – гётит – гематит – флогопит, галит, гипс». Это подтверждается данными, приведенными на рис. 3, *в*, *г*, где представленные изображения иллюстрируют совместное закрепление гипергенных и солеобразных минералов (флогопита, гипса и галита) на пленке минералов железа (гётита).

Таблица 1. Минеральные образования, диагностированные на поверхности алмазов

Минерал, формула	Параметр решетки, Å			Кристаллографическое несоответствие								
				к алмазу			к гётиту			к гематиту		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$\delta(a)$	$\delta(b)$	$\delta(c)$	$\delta(a)$	$\delta(b)$	$\delta(c)$	$\delta(a)$	$\delta(b)$	$\delta(c)$
Алмаз, C	3,57	3,57	3,57	0	0	0	0,28	1,78	0,15	0,41	–	2,85
Гётит, FeO·OH	4,59	9,94	3,02	0,28	1,78	0,15	0	0	0	0,10	–	3,55
Гематит, Fe ₂ O ₃	5,03	–	13,75	0,41	–	2,85	0,1	–	3,55	0	0	0
Флогопит, K ₂ (Mg,Fe) ₆ [Si ₆ Al ₂ O ₂₀](OH,F) ₄	5,3	9,2	10,3	0,48	1,58	1,88	0,15	0,07	2,41	0,05	–	0,1
Галит, NaCl	5,64	–	–	0,58	–	–	0,23	–	–	0,12	–	–
Гипс, CaSO ₄ ·2H ₂ O	5,68	15,2	6,29	0,58	3,25	0,76	0,24	0,53	1,08	0,13	–	0,54

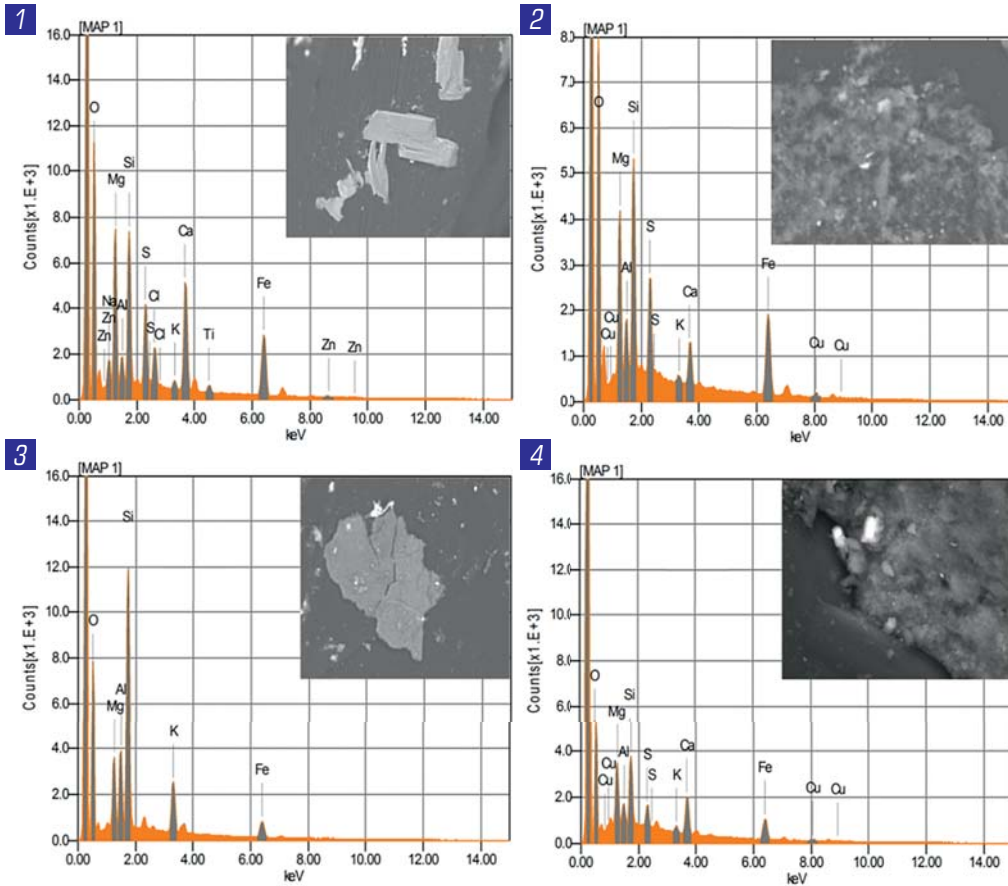


Рис. 4. Спектрограммы минеральных образований на поверхности исследуемых алмазов:
1, 2, 3, 4 – типы образований

Таким образом, результатами данного этапа исследований установлено, что в составе минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов диагностированы элементы измененных кимберлитовых пород, из которых они извлечены, а основным условием формирования минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов является соответствие химического и минерального состава подложки кристаллизации составу кристаллизующегося вещества.

Присутствующие на поверхности алмазов минеральные образования, характеризующиеся линейными размерами от 0,01 до 5 мм и толщиной от 5 до 350 мкм, классифицированы на 4 типа

в зависимости от их состава и физико-химических свойств и исследованы методом сканирующей электронной микроскопии, результаты которой представлены на **рис. 4** и в **табл. 2**. Первый, наиболее распространенный тип минеральных образований характеризуется примазками породы на гидрофильной поверхности алмаза, представленной в основном адгезионно-активными глинистыми образованиями типа серпентина; второй, менее распространенный тип обусловлен примазками породы на гидрофобной поверхности алмаза, состоящей из различных минералов, обладающих повышенной гидрофобностью, типа талька; третий тип представляет собой механически прочный комплекс «алмаз –

Таблица 2. Классификация и характеристики минеральных образований на поверхности исследуемых 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

* Цифры в числителе – диапазон; в знаменателе – среднее значение.

пергенно измененная порода» за счет воздействия гипергенных факторов; четвертый тип минеральных образований – это тонкая пленка, образовавшаяся при кристаллизации карбонатных, гидроксидкарбонатных, сульфатных и других солей из пересыщенных водных сред, характерных для пульп основных подготовительных и обогатительных процессов.

Анализ приведенных спектров позволяет сделать вывод о близости элементного состава минеральных образований на поверхности исследуемых алмазов из кимберлитов различного вещественного состава, что указывает на идентичность механизма их образования.

Заключение

На основании анализа результатов выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Исследования поверхности алмазов интенсивно измененных кимберлитов показали, что минеральные образования представлены в основном полиминеральными макрообразованиями кальций-магний-силикатно-карбонатного состава, полирельефными шламовыми покрытиями кальций-магний-силикатно-карбонатного состава с линейными размерами от 16 до 120 мкм и

шламовыми примазками тальк-сметитового состава. Практически во всех минеральных образованиях выявлено железо. Диагностируемые элементы соответствуют минеральному составу исходных кимберлитовых пород.

2. Основные компоненты механически устойчивых рельефных поверхностных образований на алмазах представлены карбонатами (40–60 % отн.), гидроксидами (10–20 % отн.) кальция, магния и железа, кремнеземом и алюмосиликатами (15–25 % отн.).

3. В качестве наиболее вероятного механизма образования минеральных примесей на поверхности алмазных кристаллов принят процесс кристаллизации в условиях, когда поверхность алмаза служит матрицей, формирующей фазу кристаллизующейся соли.

4. Впервые создана классификация поверхностных образований на поверхности алмаза, имеющих различное происхождение и свойства.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 45–51
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.09

Experimental validation of interconnection between kimberlite composition and mechanism of formation of mineral species on the surface of natural diamonds

Information about authors

G. P. Dvoichenkova¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, dvoigp@mail.ru

O. E. Kovalchuk², Chief Engineer

Yu. A. Podkamennyi¹, Engineer

A. S. Timofeev¹, Junior Researcher

¹ Academician Melnikov Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Research and Exploration Works, ALROSA Group, Mirny, Russia

Abstract

Based on a series of mineralogical studies, the identity of compositions of altered kimberlite and kimberlite processing slime has been found. The content of clayey minerals of the type of talc, talc-saponite, chlorite-saponite, Na-saponite and X-ray amorphous phase is high—to 50%. Calcite, dolomite and serpentine are present, too.

The surface composition of natural diamonds when interacting with the identified minerals is studied using the methods of optical and infrared spectroscopy of the X-ray spectrum microanalysis.

The tests involved kimberlite of different material constitution, finely disperse slimes after kimberlite processing and diamond crystals from products of kimberlite ore processing. The natural diamond crystals extracted from kimberlite ore and processing products were of three types: naturally hydrophobic crystals free from mineral species on the surface; naturally hydrophobic crystals with a few mineral species on the surface; naturally hydrophilic crystals with the dense surface coating of mineral species.

It is shown that the surface of natural diamonds with mineral species formed on it is nonuniform, characterized by spread of calcium and magnesium carbonate films and has a mosaic coat of microsize admixtures from hydrophilic magnesium silica of talc-serpentine type with the increased mass fraction of iron. The area and depth of spread of mineral species on the surfaces of naturally hydrophobic and hydrophilic diamonds is provisional.

The mechanism of formation and attachment of mineral species on the surface of crystals in the course of processing of altered kimberlite consists in the degree of conformity between parameters of crystal lattices of a crystallizing substance and a crystal surface has for the first time been discovered, and the classification of 4 types of mineral species forming on the surface of natural diamonds has for the first time been proposed.

The experiments have been implemented in the laboratories of IPKON and Yakutniproalmaz Institutes and at Research and Explorations Works, ALROSA.

The study has been carried out in the framework of IPKON RAS R&D Program No. 0138-2014-0002 under support of Academician V. A. Chanturiya School, Grant No. 74820145.

Keywords: diamond, kimberlite, mineral species, spectroscopy, modification, slime, admixtures.

References

1. *Progressive technologies of complex processing of mineral raw materials: collection of materials*. Ed.: V. A. Chanturiya. Moscow: "Ore and Metals" Publishing House, 2008. 283 p.
2. Goryachev B. E. Technology of diamond-bearing ores. Diamonds, kimberlites and kimberlite minerals.

Mineral-resource base of the world diamond-mining industry: tutorial. Moscow: Izdatelstvo «MISI», 2010. 326 p.

3. Danilov Yu. G., Leontev S. P. Diamond mining in the Arctic regions of the Sakha Republic (Yakutia). *Kontsept*. 2016. No. 11. pp. 125–130. Available at: <https://e-koncept.ru/2016/16246.htm> (accessed: 15.04.2017).
4. Dvoychenkova G. P. Mineral formations on natural diamond surface and their destruction using electrochemically modified mineralized water. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 4. pp. 159–171.
5. Trofimova E. A., Bogachev V. I., Dvoychenkova G. P., Zuev A. V., Minenko V. G. Mechanism of passivation and activation of natural diamonds in the processes of their extraction from kimberlites. *Reports of the II Congress of dressers of the CIS countries*. Moscow: MISI, 1999. p. 112.
6. Zhang J., Kouznetsov D. L., Yu M., Rylatt M., Yoon R.-H. Improving the separation of diamond from gangue minerals. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 36–38. pp. 168–171.
7. Kovalenko E. G. Substantiation and choice of the conditions of mineral films removing from diamond surface during thermal processing. *Scientific basis and practice of processing of ores and technogenic raw materials: materials of the XVII International scientific-practical conference*. Ekaterinburg, 2014. pp. 170–173.
8. Chanturiya V. A., Dvoychenkova G. P., Kovalchuk O. E., Timofeev A. S., Podkamennyi Yu. A. Analysis of distribution of secondary minerals and their associations in the metasomatically changed kimberlite ores and their processing products. *Rudy i metally*. 2016. No. 2. pp. 73–83.
9. Chanturiya V. A., Dvoychenkova G. P., Kovalchuk O. Ye. Mechanism of fine dispersed mineral formation on the surface of diamonds and their removal by water system electrolysis products. *Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress – IMPC 2016*. Québec, 2016.
10. Independent Expert Report on Reserves and Resources of the Diamond Assets of the ALROSA Group of Companies. Norwich: Micon International Co Ltd, 2013. 429 p. Available at: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2013/11/Alrosa_Independent_Expert_Report-20131.pdf (accessed: 15.04.2017).
11. Verkhoturov M. V., Amelin S. A., Konnova N. I. Diamond dressing. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya*. 2012. No. 2. p. 61.
12. Maksimovskiy E. A., Fayner N. I., Kosinova M. L., Rumyantsev Yu. M. Investigation of structure of fine nanocrystalline films. *Zhurnal strukturnoy khimii*. 2004. Vol. 45. pp. 61–65.
13. Monachon C., Weber L. Effect of diamond surface orientation on the thermal boundary conductance between diamond and aluminum. *Diamond and Related Materials*. 2013. No. 39. pp. 8–13.
14. Garrels R. M., Christ Ch. L. *Solutions, Minerals and Equilibria*. Translated from English. Moscow: Mir, 1968. 368 p.
15. Wang J., Wan L., Hao S., Chen J. Surface modification of diamond and its effect on the mechanical properties of diamond/epoxy composites. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2017. Vol. 24, Iss. 2. pp. 271–278.
16. Strickland-Constable R. F. *Kinetics and Mechanism of Crystallization*. Translated from English. Leningrad: Nedra, 1971. 312 p.
17. Fang L. Morphology and Spectral Characteristics of Octahedral Diamond Crystals from Yubileynaya Diamond Pipe (Yakutiya). *Journal of Superhard Materials*. 2013. Vol. 35, No. 4. pp. 214–219.
18. Rossman G. R. *Vibrational Spectroscopy of Hydrous Components*. *Reviews in Mineralogy*. 1988. Vol. 18. Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology. pp. 193–206.