

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

### КЛАССИФИКАЦИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В. А. Чантурия<sup>1</sup>, Г. П. Двойченкова<sup>1</sup>, О. Е. Ковальчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: dvoigp@mail.ru,  
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК "АЛРОСА",  
Чернышевское шоссе, 16, 678174, г. Мирный, Россия

Комплексом аналитических исследований установлены различия в составе минеральных образований на поверхности природных алмазов интенсивно измененных кимберлитов в условиях залегания и переработки алмазосодержащих руд. Предложена классификация минеральных образований на алмазах в зависимости от их происхождения, свойств и способа закрепления на поверхности кристаллов.

*Минеральные образования, алмаз, кимберлит, гидрофильность, гидрофобность, классификация*

Снижение флотационной активности алмазов обусловлено гидрофильными минеральными образованиями на поверхности кристаллов, что является причиной снижения эффективности их извлечения физико-химическими методами [1–6].

В технологических процессах переработки алмазосодержащих руд на поверхности алмазов формируются полиминеральные пленки и функциональный покров, представленный молекулами соединений (СО, СО<sub>2</sub>, N, Н<sub>2</sub>О и т. д.), природа которого зависит от условий его формирования и оказывает значительное влияние на модификацию физических и химических свойств поверхности алмаза [7–9]. Высокая степень изменения основной массы труднообогатимых кимберлитов, связанная с содержанием вторичных минералов (до 80–90 %), приводит к снижению извлечения алмазов физико-химическими процессами и в том числе пенной сепарацией до 70–80 %, тогда как из кимберлитов с низкой степенью метаморфизма и содержанием вторичных минералов менее 50 % извлечение алмазов составляет 80–90 % [10, 11].

Систематизация минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов, а также их последующая классификация необходимы для обоснования и выбора технологии восстановления гидрофобных свойств алмазов перед процессами липкостной и пенной сепарации труднообогатимых кимберлитовых руд с высокой степенью метаморфизма.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН — ОНЗ-5 под руководством академика В. А. Чантурия.

Для достижения поставленной цели с участием специалистов ИПКОН РАН и АК “АЛРОСА” в лабораториях институтов НИГП и “Якутнипроалмаз” исследован состав и свойства поверхности не извлекаемых физико-химическими методами гидрофильных алмазов.

Идентификация состава и структурных особенностей минеральных образований на поверхности алмазных кристаллов осуществлялась полуколичественным рентгенографическим методом с использованием следующего оборудования: рентгеновские дифрактометры ДРОН-2.0 (НПП “Буревестник”), DMAX-2400 (Rigaku), ARL X'TRA-155 (Thermo scientific), термоанализатор DTG-60АН (Shimadzu). Химический состав минеральных компонентов определялся методом микрорентгеноспектрального анализа с использованием микроанализатора JXA-8800R. Для анализа минерального состава образований и пленок на поверхности кристаллов алмазов также применен метод ИК-спектроскопии. Исследование поверхностных образований на алмазах проведено путем сравнения эталонных инфракрасных спектров пропускания минералов с полосами примесей на алмазах.

С учетом ранее полученных данных [2, 5–9] установлено, что состав гидрофобной поверхности алмазов характеризуется отдельными минеральными образованиями, представленными преимущественно магниевыми силикатами серпентинового типа; также кристалл покрыт слоем газов типа  $\text{CO}_2$  и радикалами  $\text{HCO}_3$ . Гидрофильная поверхность алмазных кристаллов имеет рельефные минеральные образования, пленки карбонатов и отдельные минеральные образования, выполненные преимущественно магниевыми силикатами тальковой группы. Площадь распространения минеральных образований на поверхности гидрофобных алмазов не превышает 25 %, тогда как на гидрофильных кристаллах это значение достигает 70 %. Толщина минеральных образований на поверхности гидрофильных алмазов в 2–3 раза больше, чем на гидрофобных кристаллах.

Задача настоящих исследований заключалась в установлении особенностей морфологии и химии минеральных образований на поверхности алмазов труднообогатимых интенсивно измененных кимберлитов с последующей их систематизацией и классификацией.

Изучение морфологии поверхности исследуемых алмазов выполнено на сканирующем электронном микроскопе Jeol-5610, работающем в комплексе с анализатором INCA. На основе анализа полученных результатов и с учетом данных [9–12] показано, что у гидрофобных кристаллов алмаза поверхность достаточно однородная и практически не имеет макрообразований из других минералов. Поверхность гидрофильных кристаллов, наоборот, неоднородна по рельефу, имеет сколы, трещины и полости, в которых обнаружены макро- и микрообразования из Mg, Si, Ca, Fe и других элементов.

Анализ снимков природных алмазных кристаллов метасоматически измененных кимберлитов позволил установить, что диагностируемые на их поверхности минеральные образования характеризуются смешанными рельефными формами и концентрируются вблизи нарушений однородности алмазной поверхности (рис. 1).

Присутствующие на поверхности алмазов минеральные образования с 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. Каждый тип диагностированных минеральных образований исследован методом сканирующей электронной микроскопии, результаты которой представлены на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 2а приведено изображение и рентгеновский спектр первого типа рельефного полиминерального макрообразования на алмазах с гидрофильной поверхностью, анализ которого позволяет оценить линейный размер данного образования в 16 мкм и высоту в 4 мкм.

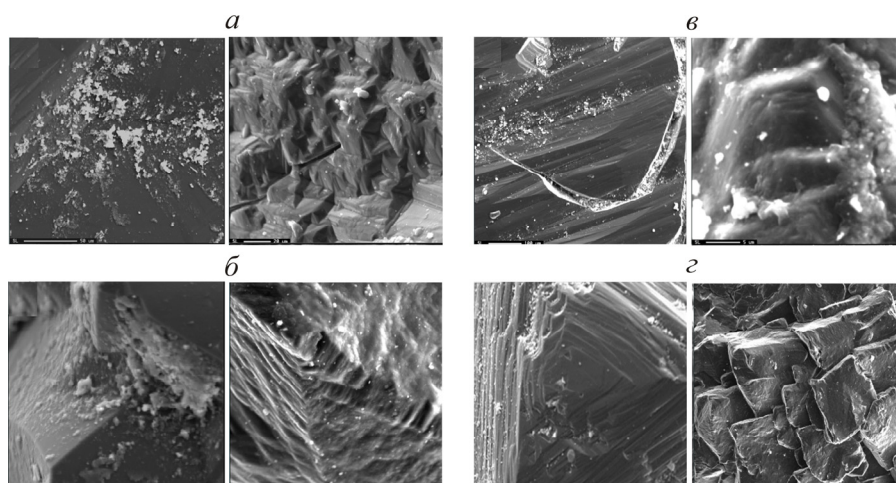


Рис. 1. Внешний вид рельефных минеральных образований на различных участках поверхности исследуемых алмазных кристаллов: *а* — на ровной поверхности алмаза; *б* — во впадинах; *в* — в трещинах и сколах; *г* — на ступенях роста кристалла и во впадинах

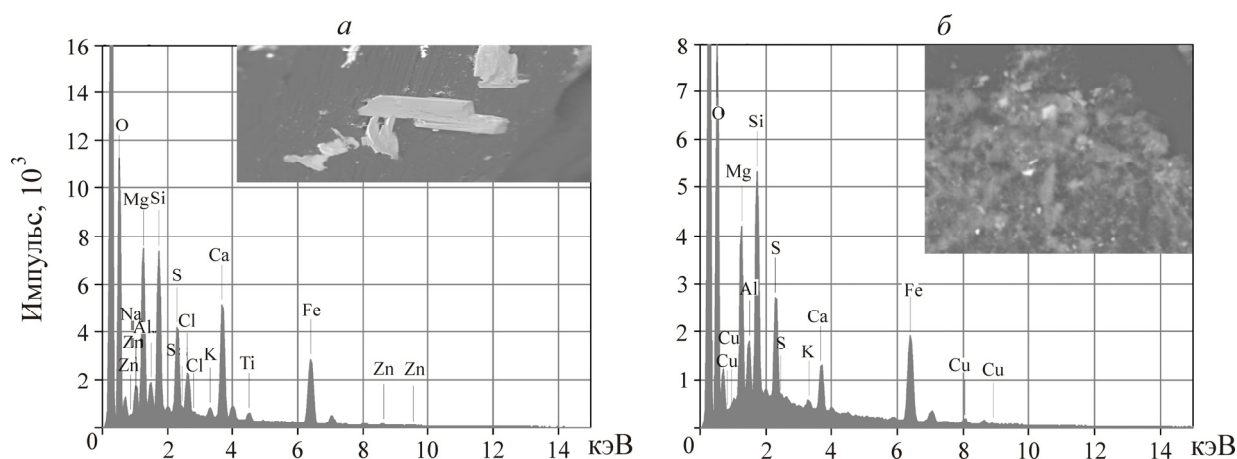


Рис. 2. Изображение углеродной реплики и электронный спектр рельефного минерального (*а*) и шламового минерального (*б*) образований на поверхности алмаза

Анализ электронного спектра диагностированного минерального образования указывает на кальций-магний-силикатно-карбонатный состав исследуемой примеси. Присутствуют железо, титан и сера. Обнаружены небольшие количества натрия и хлора, что свидетельствует об участии в строении исследуемого поверхностного образования галита или хлорида кальция. Такая характеристика, как правило, соответствует элементному составу гидротермально измененных кимберлитов.

На рис. 2б представлено изображение и рентгеновский спектр второго типа полирельефного шламового поверхностного образования на алмазах с гидрофильной поверхностью.

Анализ изображения позволяет оценить линейный размер данного образования в  $120 \times 180$  мкм, а высоту от 0 до 20 мкм. Представленное поверхностное образование состоит из разноструктурных объектов и множества микроглобул. Анализ обобщенного электронного спектра указывает на кальций-магний-силикатно-карбонатный состав. Присутствуют железо и сера.

Сопоставлением спектров изученных минеральных образований установлены имеющиеся различия в их элементном составе. Второй тип диагностированных примесей практически не содержит натрия и хлор, что свидетельствует о неучастии в строении исследуемого поверхностного образования галита или хлорида кальция. Такая особенность соответствует элементно-

му составу шламовых классов гидротермально измененных кимберлитов, характеризующихся большой массовой долей кремния и меньшей — кальция. Для обоих типов рассмотренных минеральных образований характерно высокое содержание железа.

Третий и четвертый типы минеральных примесей, диагностируемых на поверхности исследуемых алмазных кристаллов, характеризуются присутствием двух групп крупных шламовых образований, в которых выборочно концентрируются минералы с выраженными гидрофобно-гидрофильными свойствами. Образец третьего типа поверхностного образования в виде шламовой примазки тальк-сметитового состава, представляющей собой конгломерат относительно гидрофобных шламовых частиц, приведен на рис. 3а.

Анализ изображения примеси позволяет оценить линейный размер образования в  $100 \times 180$  мкм, а высоту от 0 до 20 мкм. Структура рассматриваемого объекта достаточно однородна и не содержит микроглобул. Анализ электронного спектра минерального образования указывает на его кальций-магний-алюмосиликатный состав. Практически отсутствует сера, не обнаруживаются хлор и натрий. Сопоставление полученного спектра со спектрами основных породных минералов позволяет диагностировать поверхностное образование как смесь талька и смектита, характеризующихся достаточно гидрофобными свойствами.

Образец четвертого типа поверхностного образования в виде шламовой примазки, представляющей собой конгломерат относительно гидрофильных шламовых частиц серпентин-карбонатного состава, приведен на рис. 3б.

Анализ изображения позволяет оценить линейный размер данного образования в  $150 \times 180$  мкм, а высоту от 0 до 40 мкм. Поверхностное образование представлено неоднородным по структуре объектом, в отдельных частях которого видны рельефные поверхностные образования. Анализ электронного спектра примеси указывает на кальций-магний-алюмосиликатный состав как примазок, так и рельефных образований. Диагностируется в незначительных количествах калий, практически отсутствуют хлор и сера. Сопоставление полученного спектра со спектрами основных породных минералов позволяет определить поверхностное образование как смесь серпентин-карбонатных минералов. Такая смесь в отличие от минерального образования тальк-сметитового типа представляет собой конгломерат гидрофильных шламовых частиц.

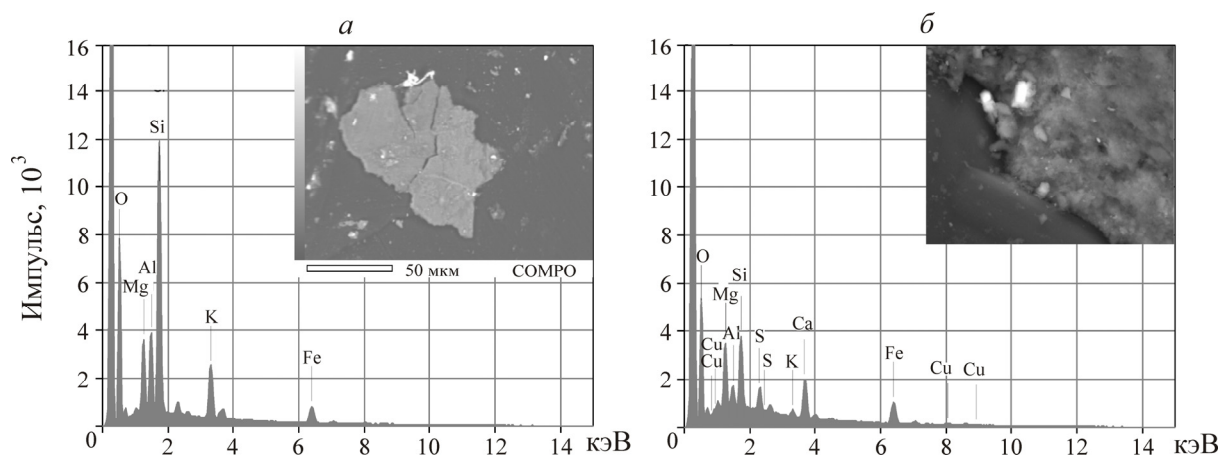


Рис. 3. Изображение углеродной реплики и электронный спектр тальк-сметитового (а) и серпентин-карбонатного (б) образований на поверхности алмаза

Следует отметить, что в основном именно минеральные образования третьего и четвертого типов характерны для поверхности гидрофильных алмазов, теряемых в процессах флотационного обогащения.

Результатами проведенных исследований в изученных образцах минеральных образований методом микрорентгеноспектрального анализа зафиксировано распределение кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) и в резко подчиненном количестве гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Кальциевые минералы встречаются на поверхности исследуемых алмазных кристаллов в виде как отдельных компактных образований, так и равномерно распределенных пленок и микроглобул, где кальциевые минералы рассеяны совместно с силикатами (рис. 4).

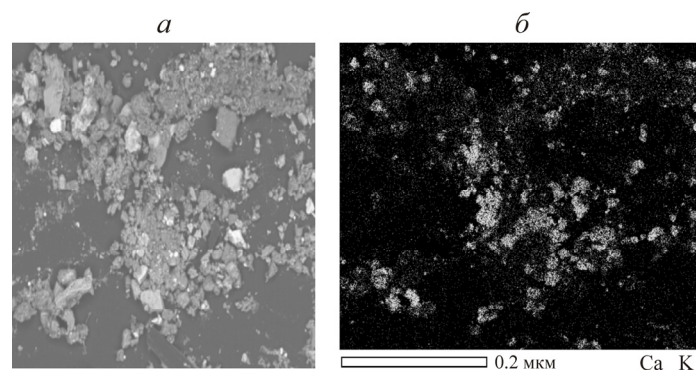


Рис. 4. Изображения комбинации минеральных образований (а) и распределение кальция (б) на поверхности алмаза (кальций выделен белым цветом)

Особый интерес представляют результаты полуколичественного анализа весьма тонких (до 1 мкм) пленочных образований. Из диагностируемых примесей обнаруживается наиболее высокая поверхностная концентрация кальция (табл. 1). Отношение суммы магния, кремния и алюминия к кальцию не превышает 20 %. Такие результаты позволяют заключить, что тонкие пленки на поверхности алмаза имеют преимущественно кальций-карбонатный состав.

ТАБЛИЦА 1. Результаты анализа поверхностных пленочных образований на исследуемых алмазах

Элемент	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Массовая доля, %	62.0	28.9	0.6	0.8	0.1	0.7	0.2	0.3	0.0	6.2	0.1

Для подтверждения полученных результатов применен метод ИК-спектроскопии. По характеру расположения линий Si-O и OH в полученных ИК-спектрах идентифицировано наличие на поверхности алмазов силикатов, аналогичных тальку, кварцу, гипсу, кальциту (рис. 5). Методом инфракрасной спектроскопии также зафиксированы: молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ , связи: C (алмаз)-H, C-H<sub>2</sub>, C-H<sub>3</sub>, O-H.

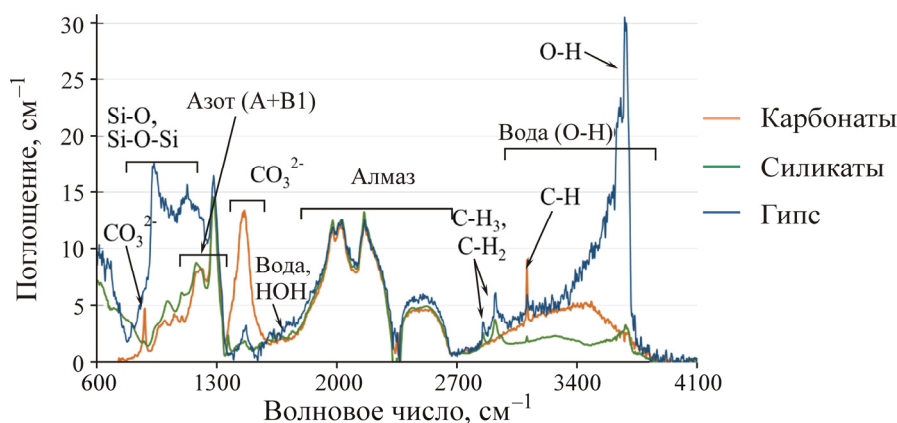


Рис. 5. ИК-спектры поглощения поверхности алмазов с гидрофильными минеральными образованиями

На основании анализа результатов, полученных в настоящих исследованиях и в ранее выполненных работах [12–14], установлена и подтверждена определяющая роль соответствия химического и минерального состава поверхностных образований и пленок на алмазах составу вмещающих пород. При близком соответствии этих материалов можно заключить, что поверхностные образования и вмещающие породы имеют общее происхождение, а также сделать вывод, что сростки алмаза и вмещающей породы имеют природу, обусловленную процессом кристаллизации. При отсутствии такого соответствия можно предположить техногенный характер минеральных образований, обусловленный адгезионными или химическими процессами (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Состав и свойства минеральных образований на поверхности исследуемых природных алмазных кристаллов

Тип поверхностного минерального образования	Толщина, мкм	Линейный размер, мм	Минеральный состав			
			Карбонаты	Гидроксид железа	Слоистые алюмосиликаты	Глины
Конгломерат (примазка) породных минералов на гидрофильной поверхности алмаза	$\frac{20-280}{145}$	$\frac{0.01-1.5}{0.44}$	$\frac{4-16}{8.8}$	$\frac{0.5-1.9}{0.91}$	$\frac{21-42}{29.6}$	$\frac{46-75}{54.4}$
Конгломерат (примазка) породных минералов на гидрофобной поверхности алмаза	$\frac{20-280}{145}$	$\frac{0.01-1.5}{0.44}$	$\frac{3-14}{7.3}$	$\frac{0.1-1.5}{0.73}$	$\frac{42-82}{59.6}$	$\frac{16-28}{21.5}$
Устойчивый сросток алмаза и породных минералов	$\frac{20-350}{198}$	$\frac{0.03-3.0}{0.88}$	$\frac{23-74}{47.1}$	$\frac{1.5-6.5}{3.72}$	$\frac{12-22}{17.1}$	$\frac{6-18}{10.8}$
Техногенное пленочное образование на поверхности алмаза	$\frac{5-30}{15.8}$	$\frac{0.03-5.0}{1.74}$	$\frac{53-91}{77.7}$	$\frac{1.5-4.5}{2.66}$	$\frac{3-12}{6.7}$	$\frac{3-12}{6.8}$

## ВЫВОДЫ

На основании полученных данных впервые представлена классификация минеральных образований на поверхности природных алмазов труднообогатимых, интенсивно измененных метасоматическими процессами руд и выделено четыре типа образований:

— первый, наиболее распространенный тип характеризуется примазками породы на гидрофильной поверхности алмаза, представленной адгезионно активными глинистыми образованиями типа серпентина, которые обычно формируются в процессах рудоподготовки, но относительно легко могут разрушаться в последующих технологических циклах с участием реагентов-стабилизаторов;

— второй, менее распространенный тип обусловлен примазками породы на гидрофобной поверхности алмаза, состоящей из различных минералов, обладающих повышенной гидрофобностью, типа талька. Эти минеральные образования будут закрепляться на естественной или гидрофобизированной поверхности алмаза. Энергия их закрепления значительно меньше, чем при взаимодействии гидрофильных поверхностей, и такие примеси удаляются с поверхности алмаза практически во всех обогатительных процессах при замещении газовыми пузырьками или жиром. Однако наличие подобных образований затрудняет процессы пенной и липкостной сепарации из-за ослабления контакта воздушной или жировой фазы с минеральной поверхностью;

— третий тип представляет собой механически прочный комплекс “алмаз–гипергенно измененная порода” за счет воздействия гипергенных факторов, определяемых в первую очередь глубиной залегания (при окислительном и карбонатном воздействии) или нахождением в зоне подземных водных потоков, насыщенных хлоридами и сульфидами щелочных и щелочноземельных минералов;

— четвертый тип представляет собой тонкую пленку, образовавшуюся при кристаллизации карбонатных, гидроксид карбонатных, сульфатных и других солей из пересыщенных водных сред, характерных для пульп основных подготовительных и обогатительных процессов. Несмотря на малую толщину пленки, такие минеральные образования кардинально увеличивают гидрофильные свойства поверхности алмазов и снижают их способность извлекаться методами пенной и липкостной сепарации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А., Трофимова Э. А., Двойченкова Г. П., Богачев В. И., Миненко В. Г., Диков Ю. П.** Теория и практика применения электрохимического метода водоподготовки с целью интенсификации процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов // Горн. журн. — 2005. — № 4. — С. 51–55.
2. **Чантурия В. А., Трофимова Э. А., Диков Ю. П., Богачев В. И., Двойченкова Г. П., Миненко В. Г.** Механизм пассивации и активации поверхности алмазов при переработке алмазосодержащих руд // Обогащение руд. — 1999. — № 6. — С. 14–18.
3. **Трофимова Э. А., Зуев А. В., Двойченкова Г. П., Богачев В. И.** Эффективность применения бездиафрагменной электрохимической водоподготовки в процессах обогащения алмазосодержащих кимберлитов // Развитие идей И. Н. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии. — М.: ННЦ ГП–ИГД им. А. А. Скочинского, 2000. — 327 с.
4. **Двойченкова Г. П., Миненко В. Г., Ковальчук О. Е. и др.** Интенсификация процесса пенной сепарации алмазосодержащего сырья на основе электрохимического метода газонасыщения водных систем // Горн. журн. — 2012. — № 12. — С. 88–92.
5. **Чантурия В. А., Горячев Б. Е.** Обогащение алмазосодержащих кимберлитов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. — М.: Изд. дом “Руда и металлы”, 2008. — С. 151–163.
6. **Чантурия В. А., Трофимова Э. А., Диков Ю. П., Двойченкова Г. П., Богачев В. И., Зуев А. А.** Связь поверхностных и технологических свойств алмазов при обогащении кимберлитов // Горн. журн. — 1998. — № 11–12. — С. 52–56.
7. **Кулакова И. И.** Химия поверхности наноалмазов // Физика твердого тела. — 2004. — Т. 46. — Вып. 4. — С. 621–628.
8. **Алешин В. Г., Смехнов А. А., Крук В. Б.** Химия поверхности алмаза. — Киев: Наук. думка, 1990. — 200 с.
9. **Чантурия В. А., Трофимова Э. А., Богачев В. И., Двойченкова Г. П.** Минеральные и органические нанообразования на природных алмазах: условия их формирования, методы их удаления // Горн. журн. — 2010. — № 7. — С. 68–71.
10. **Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е., Коваленко Е. Г.** Изменение технологических свойств алмазов в условиях переработки вторично измененных кимберлитов // Руды и металлы. — 2013. — № 3. — С. 48–55.
11. **Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е., Тимофеев А.С.** Особенности состава поверхности гидрофильных алмазов и их роль в процессе пенной сепарации // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 173–181.
12. **Двойченкова Г. П.** Формирование минеральных образований на поверхности природных алмазов и метод их деструкции на основе электрохимически модифицированных минерализованных вод // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 159–171.
13. **Максимовский Е. А., Файнер Н. И., Косинова М. Л., Румянцев Ю. М.** Исследование структуры тонких нанокристаллических пленок // Журн. структур. химии. — 2004. — Т. 45. — С. 61–65.
14. **Стрикленд-Констэбл Р. Ф.** Кинетика и механизм кристаллизации: пер. с англ. — Л.: Недра, 1971. — 310 с.

Поступила в редакцию 18/II 2016