

## МИНЕРАЛОГИЯ РЕГИОНОВ (МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЯКУТИИ)

УДК 549.211

© Д. чл. В. С. ШКОДЗИНСКИЙ

### ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВОВ НА КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИЮ АЛМАЗА

V. S. SHKODZINSKY. INFLUENCE OF MELTS VISCOSITY UPON CRYSTAL  
MORPHOLOGY OF DIAMONDS

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,  
677891, Якутск, пр. Ленина, 39; shkodzinskiy@diamond.ysn.ru*

It is shown that degree of the media supersaturating by carbon, determining the crystal morphology of diamonds, depends mainly on SiO<sub>2</sub> content and connected viscosity of kimberlite and lamproite melts, because coefficient of carbon diffusion is decreasing in million times together with increase of the SiO<sub>2</sub> content. This concept is confirmed by the sharp decrease in amount of octahedrons and proportional increasing in quantity of rounded crystals and their II—VII varieties (by Yu. L. Orlov classification) along with rise of SiO<sub>2</sub> concentration in magmatic rocks. Plotted diagrams allow to appraise a type of sources for diamond-bearing placers by the crystal morphology.

В последнее десятилетие большое внимание уделяется изучению особенностей морфологии кристаллов алмаза из различных месторождений, так как результаты такого изучения позволяют прогнозировать тип коренных источников для россыпей. Для такого прогнозирования важно иметь правильное представление о происхождении морфологических разновидностей алмаза, особенно его округлых кристаллов, широко распространенных в россыпях.

Природа округлых алмазов уже более века является предметом дискуссии. В начале прошлого столетия А. Е. Ферсман, В. М. Гольдшмит, а позже И. И. Шафрановский, Ю. Л. Орлов (1963) и другие исследователи пришли к выводу, что округлые алмазы образовались в результате начальных стадий растворения плоскогранных кристаллов, поскольку на гранях округлых кристаллов часто присутствуют скульптуры травления. Предполагалось, что вследствие более обширного диффузионного оттока атомов углерода вершины и ребра кристаллов растворялись с большей скоростью, чем грани, что привело к появлению округлых форм. Сторонники образования округлых алмазов в процессе роста (Аншлесс, 1956; Гневушев и др., 1964, и др.) отмечали, что скульптуры травления существуют и на плоскогранных кристаллах и часто отсутствуют на округлых, а поэтому не доказывают образования последних путем растворения. На округлых кристаллах вершины и ребра обычно остаются острыми (рис. 1, а), что противоречит гипотезе растворения. Эти исследователи предполагали, что округлые кристаллы возникали путем антискелетного роста, при котором слои роста с большей скоростью формировались в центре граней.

Накопленный за последние десятилетия большой материал по внутреннему строению кристаллов алмаза позволяет предполагать, что округлые кристаллы чаще всего образовались путем роста, так как внутренние зоны зональных кристаллов обычно также являются округлыми, остросереберными и субпараллельными внешней поверхности (рис. 1, а). На гранях округлых кристаллов часто сохраняются остатки тонких

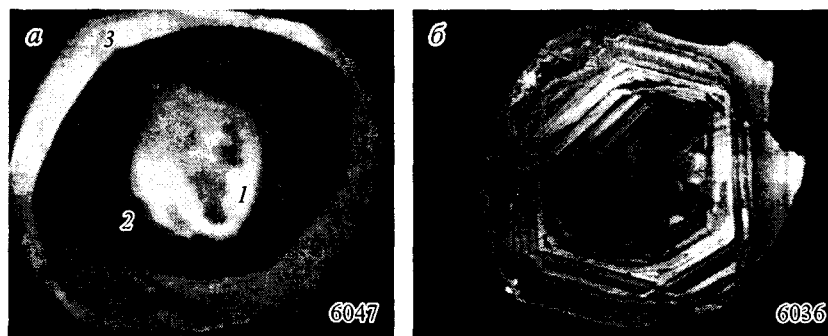


Рис. 1. Округлые кристаллы алмаза.

*a* — додекаэдрон роста с округлой промежуточной зоной; 1 и 3 — голубая люминесценция, 2 — не светится. Увел. 17; *б* — кристалл с зональной катодолюминесценцией. Внешняя поверхность и промежуточные зоны частично секут плоскогранные слои роста. Увел. 14 (Барашков и др., 2004).

Fig. 1. Rounded crystals of diamond.

металлических пленок, с участием которых происходил рост кристаллов (Чайковский, 2001 и др.). В округлых алмазах более широко распространен экзогенный парагенезис включений, чем в плоскогранных. Так, в уральских алмазах он составляет до 80 % (Чайковский, 2001), тогда как в плоскогранных алмазах кимберлитов центральной части Сибирской платформы его содержание снижается до 1 % и менее (Зинчук, Коптиль, 2003). В них часто встречаются включения козсита (до 20 % — Чайковский, 2001), очень редкие в плоскогранных алмазах. Это свидетельствует об обычно иной среде роста округлых алмазов по сравнению с плоскогранными, поэтому они чаще всего не являются результатом растворения последних. Вместе с тем встречаются алмазы, в которых внешняя округлая поверхность, а иногда и некоторые внутренние зоны секут плоскогранные слои роста. При этом слои, возникшие после внутренней округлой зоны, вновь формировались как плоскогранные (рис. 1, б). Это свидетельствует о возникновении некоторых округлых алмазов путем растворения плоскогранных кристаллов.

В соответствии с теорией кристаллизации (Бокий и др., 1986; Sunagava, 1984; Бартошинский, Квасница, 1991, и др.) плоскогранные кристаллы алмаза образовались путем тангенциального роста при небольших пересыщениях среды углеродом. В этом случае новый слой возникал в результате присоединения атомов к возникшей ступени роста, поскольку здесь на поверхность выходит больше свободных валентных связей, чем на атомно-гладких плоскостях. Образующийся слой распространялся по всей поверхности грани и поэтому является плоским, несмотря на большой диффузионный подток атомов к ребрам и вершинам кристаллов. В случае больших пересыщений грани являются атомно-шероховатыми. Атомы присоединялись ко всей поверхности кристалла (нормальный или адгезивный рост) и скорость роста его отдельных частей определялась интенсивностью подтока к ним присоединяемых атомов и оттока примесей и выделявшегося тепла. Диффузионные процессы наиболее интенсивно протекали около вершин и ребер, поэтому в механически малоподвижной среде эти части кристаллов росли быстрее граней и формировали скелетные кристаллы с вогнутыми гранями. Грани куба являются атомно-шероховатыми, поэтому они росли преимущественно при больших пересыщениях. Для образовавшихся в этих условиях алмазов характерно радиально-волокнистое или мозаично-блочное строение, отражающее рост от центра к периферии кристаллов, тогда как при тангенциальном росте слои росли параллельно граням. Вследствие большой скорости образования зародышей при больших пересыщениях возникало повышенное количество поликристаллических агрегатов алмаза (разновидности VI—X по классификации Ю. Л. Орлова).

Для возникновения антискелетных кристаллов с выпуклыми гранями в пересыщенной углеродом среде необходим относительно равномерный подток атомов угле-

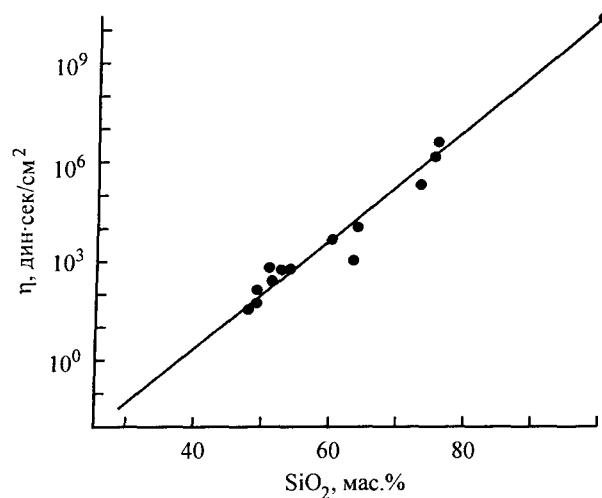


Рис. 2. Зависимость вязкости силикатных расплавов от содержания в них кремнекислоты при 1400 °С (Воларович, Корчемкин, 1937).

Fig. 2. Dependence of the silicate melts viscosity on the SiO<sub>2</sub> content at 1400 °C temperature (after Volarovith, Korchemkin, 1937).

рода к различным частям кристаллов. Представляется, что такой подток наиболее эффективно мог возникать в механически подвижной среде. Он должен был происходить, например, при вращении кристаллов на границе слоев расплава, текущих с разной скоростью, или при погружении кристаллов в расплаве. В этом случае расплав обтекал разные части кристаллов с почти одинаковой интенсивностью и доставлял к ним почти равные количества атомов углерода, поэтому форма растущих кристаллов приближается к шарообразной. Судя по присутствию на многих округлых кристаллах острых ребер и вершин, эти части все же росли несколько быстрее, чем грани, хотя и меньше опережали последние, чем на плоскогранных и особенно на скелетных кристаллах. Процессы течения были очень широко распространены в кимберлитовых магмах, поскольку последние поднимались с глубины около 200—250 км. Присутствие в алмазах следов пластических деформаций, обламывания кристаллов и регенерации обломков подтверждает их рост в механически высокоподвижной среде.

Причина возникновения высоких пересыщений углеродом среды кристаллизации алмаза обычно не обсуждается в литературе, хотя решение этого вопроса необходимо для оценки геологических факторов, способствовавших формированию различных кристаллов этого минерала. Очевидно, что степень пересыщения среды в общем случае определяется соотношением скорости поступления в нее углерода, например в результате протекания реакций между углеродсодержащими химическими соединениями (Шкодзинский, 1995), и скорости его стока в кристаллизующиеся алмазы. Последняя даже в механически подвижной среде в значительной мере определяется скоростью диффузии атомов углерода. В соответствии с формулой Эйнштейна—Стокса (Таблицы..., 1997),  $D = RT / (6\pi\eta r)$ , величина коэффициента диффузии в растворах  $D$  прямо пропорциональна температуре  $T$  и обратно пропорциональна вязкости среды  $\eta$  ( $R = 8.31 \cdot 10^3$  дж/кмоль · град,  $\pi = 3.14$ ,  $r$  — радиус диффундирующих молекул). Вязкость силикатных расплавов в основном определяется содержанием в них кремнекислоты (рис. 2). Последнее изменяется от первых процентов в близких к карбонатам кимберлитах Сибирской платформы (Василенко и др., 1997) до 65 % и более в силикатных стеклах алмазосодержащих туффизитов Северного Урала (Чайковский, 2001). В соответствии с рис. 2 при таких вариациях содержания кремнекислоты вязкость расплавов должна изменяться во многие миллионы раз. Совершенно очевидно,

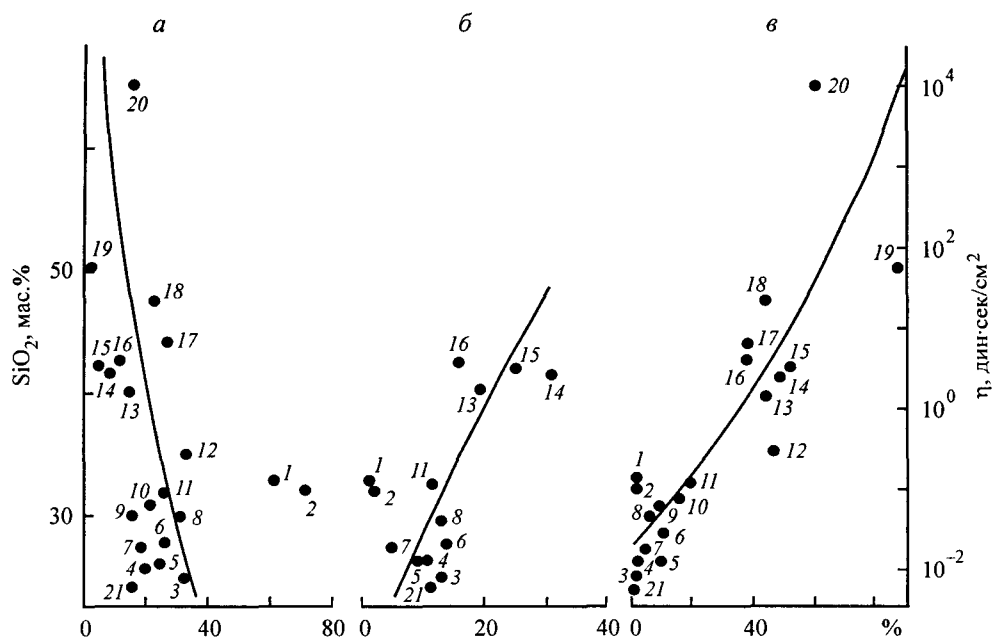


Рис. 3. Зависимость содержания октаэдров (а), разновидностей II—VII (б) и округлых кристаллов в алмазах (в) от среднего содержания кремнекислоты в разных трубках.

1 — Мир, 2 — Интернациональная, 3 — Нюрбинская, 4 — Ботоубинская, 5 — Удачная-западная, 6 — Юбилейная, 7 — Иреляхская, 8 — Сытыканская, 9 — Верхнемунская, 10 — Комсомольская, 11 — Радиоволновая, 21 — Айхал (Якутская кимберлитовая провинция), 12 — Кольцовская, 13 — Пионерская, 14 — Поморская, 15 — Карпинского, 16 — Ломоносова, 17 — Гриба (Архангельская кимберлитовая провинция), 18 — Карашахо (Узбекистан), 19—20 — интрузивные туффзиты месторождений Ефимовка (19) и Волынка (20) (Вишерский Урал). Использованы данные: Василенко и др., 1997; Зинчук, Коптиль, 2003; Лапин и др., 2004; Чайковский, 2001.

Fig. 3. Dependence of amounts of octahedrons (a), II—VII varieties (б) and rounded crystals (в) of diamonds on the average SiO<sub>2</sub> contents in different kimberlite pipes.

что эта величина несоизмеримо больше, чем величины относительных вариаций температуры и возможных вариаций скоростей протекания реакций выделения свободного углерода. Поэтому содержание кремнекислоты в среде алмазообразования является главным фактором, контролирующим величину коэффициента диффузии и степень пересыщения среды углеродом.

Если это так и верны изложенные выше представления о механизмах образования различных форм кристаллов алмаза и последние кристаллизовались в расплавах, то должна существовать четкая корреляция между распространенностью этих форм и кремнекислотностью вмещающих их или ассоциирующихся с ними магматических пород. Как иллюстрирует рис. 3, содержание октаэдров, кубических кристаллов и поликристаллических агрегатов, а также округлых алмазов хорошо коррелируется с концентрацией кремнекислоты во вмещающих алмазы магматических породах. Так, содержание плоскогранных октаэдров, формировавшихся при тангенциальном слоистом росте при небольших пересыщениях углеродом, является максимальным в бедных кремнекислотой кимберлитах маловязких магм и составляет 15—30 % в кимберлитах центральной части Сибирской платформы (в среднем 24—33 % SiO<sub>2</sub>), а в трубках Мир и Интернациональная достигает 60—70 % (рис. 3, а). В более богатых кремнекислотой кимберлитах Архангельской провинции (в среднем 35—47 % SiO<sub>2</sub>) количество октаэдров снижается до 5—26 %, а в еще более кремнекислотных (чаще всего 50—65 % SiO<sub>2</sub> в шариках стекол) туффзитах Северного Урала оно уменьшается до 2—12 %.

Суммарное содержание формировавшихся при высоком пересыщении углеродом кубических алмазов и разновидностей V—VII по классификации Ю. Л. Орлова является минимальным (2—14 %) в бедных кремнекислотой кимберлитах центральной части Сибирской платформы и значительно более высоким (16—31 %) в более кремнекислотных магматических породах Архангельской провинции (рис. 3, б). Такая же тенденция наблюдается и для округлых алмазов, также формировавшихся в условиях высокого пересыщения. Так, содержание их в малокремнекислотных кимберлитах центральной части Сибирской платформы варьирует от 0 до 20 % и с ростом кремнекислотности увеличивается до 38—52 % в кимберлитах Архангельской провинции и до 60—86 % в интрузивных туффизитах Северного Урала (рис. 3, в). Содержание округлых алмазов в россыпях р. Эбелях на севере Сибирской платформы оценивается в 50—70 %, что соответствует образованию их в лампроитах с содержанием кремнекислоты 45—55 %. Таким образом, вытекающее из теоретических данных положение о ведущей роли кремнекислотности расплавов в возникновении пересыщения их углеродом и в образовании различных морфологических типов кристаллов алмаза полностью подтверждается эмпирическими данными.

Кимберлитовые трубки обычно в высшей степени неоднородны по составу. Например, содержание кремнекислоты в трубке Айхал варьирует от 4.74 до 41.76 % (Василенко и др., 1997). В соответствии с рис. 2, вязкость ее родоначальных магм должна различаться на несколько порядков, что приводило к образованию в ней весьма различных по морфологии кристаллов. Это объясняет присутствие в одной и той же трубке очень различных кристаллов алмаза, формировавшихся в условиях как низкого, так и высокого пересыщения среды углеродом. В наименее вязких бедных кремнекислотой малопересыщенных углеродом расплавах вследствие тангенциального послонного роста формировались остросереберные плоскогранные октаэдры. В более кремнекислотных расплавах уменьшение коэффициента диффузии снижало скорость роста слоев, а возрастание степени пересыщения углеродом увеличивало скорость их зарождения. Поэтому слои, особенно в крупных кристаллах, не успевали дорасти до ребер и вершин, что приводило к притуплению последних и к появлению около них штриховки (следов выходов слоев роста). В еще более кремнекислотных расплавах степень недорастания слоев была выше. Это обусловило образование на месте ребер октаэдра ламинарных псевдограней (граней торможения) ромбододекаэдроидов. Возрастание степени пересыщения углеродом и скорости образования зародышей граней явилось причиной полицентрического роста многих кристаллов. При дальнейшем увеличении кремнекислотности и степени пересыщения углеродом расплавов тангенциальный послонный рост сменился нормальным радиальным (иногда мозаично-блочным или фибриллярным) с образованием округлых кристаллов в механически подвижной среде и скелетных — в неподвижной, а также поликристаллических агрегатов.

Существование зависимости кристалломорфологии алмаза от кремнекислотности вмещающих его пород свидетельствует о формировании этого минерала преимущественно в родоначальных расплавах этих пород и в их исходных субстратах и противоречит гипотезе его ксеногенного происхождения. Этот вывод согласуется: 1) с наличием во многих алмазах тонких структур роста, указывающих на их образование в жидкой среде; 2) с присутствием в зональных кристаллах из кимберлитов бездефектной однородной области, тогда как алмазы из мантийных ксенолитов сложены в основном высокодефектным веществом центральной и промежуточных областей зональных кимберлитовых алмазов (Бескрованов и др., 1991); 3) с некоторым различием состава включений и температуры их образования в алмазах из кимберлитов и ксенолитов (Шкодзинский, 1995; Гаранин и др., 1999); 4) с преобладанием в подавляющем большинстве алмазов из кимберлитов перидотитового парагенезиса включений (более 99 % для алмазов центральной части Сибирской платформы — Зинчук, Коптиль, 2003), тогда как ксенолиты алмазоносных эклогитов встречаются в несколько раз чаще, чем ксенолиты алмазоносных перидотитов; 5) с экспериментальными данными М. Аримы и соавторов (Arima et al., 1993), получивших алмазы, аналогичные кимберлитовым, при нагревании кимберлитов до 1800—2000 °С при 70—77 кбар.

Таким образом, приведенные выше данные свидетельствуют об определяющей роли вязкости природных расплавов на кристалломорфологию кристаллизовавшихся в них алмазов. Округлые алмазы уральского типа, видимо, возникали преимущественно в текущих вязких расплавах.

#### Список литературы

- Анишлесс О. М.* К дискуссии о природе округлых форм алмаза // ЗВМО, 1956. Вып. 2. С. 250—252.
- Барашков Ю. П., Бескрованов В. В., Пироговская К. Л.* Типоморфизм алмазов из россыпных месторождений северо-востока Сибирской платформы. Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50). Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. С. 43—46.
- Бартошинский Э. В., Квасница В. Н.* Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наукова думка, 1991. 172 с.
- Бескрованов В. В., Спеццус Э. В., Малооголовец В. Г.* и др. Морфология и физические свойства алмазов из мантийных ксенолитов // Минер. журн. 1991. № 5. С. 31—42.
- Бокий Г. Б., Безруков Г. Н., Клюев Ю. А., Налетов А. М., Непша В. И.* Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 1986. 221 с.
- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г.* Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. М.: Наука, 1997. 575 с.
- Воларович М. П., Корчемкин П. И.* Связь между вязкостью расплавленных горных пород и кислотностью по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу // Докл. АН СССР. 1937. Т. 17. № 8. С. 413—418.
- Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Марфунин А. С.* и др. Включения в алмазе и алмазоносные породы. М.: Изд-во МГУ, 1999. 240 с.
- Гневушев М. А., Шеманина В. И., Шеманин Е. И.* Еще раз о происхождении округлых алмазов (по поводу книги Ю. Л. Орлова «Морфология алмаза») // Минер. сб. Львов. ун-та, 1964. № 18. Вып. 3. С. 361—367.
- Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
- Лапин А. В., Толстов А. В., Лисицин Д. В.* Кимберлиты и конвергентные породы. Мирный: Мирнинская городская типография, 2004. 226 с.
- Орлов Ю. Л.* Морфология алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 235 с.
- Таблицы физических величин. Справочник / Аверин В. Г., Аронзон Б. А., Бабаев Н. С.* и др. М.: Атомиздат, 1997. 1006 с.
- Чайковский И. И.* Петрология и минералогия интрузивных алмазоносных пирокластов Вишерского Урала. Пермь: Изд-во ПГУ, 2001. 324 с.
- Шкодзинский В. С.* Происхождение кимберлитов и алмаза. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1995. 168 с.
- Arima M., Nakayama K., Akaishi M. e. a.* Crystallization of diamond from a silicate melt of kimberlite composition in high-pressure and high-temperature experiments // Geology. 1993. Vol. 21. P. 968—970.
- Sunagava I.* Materials science of the Earth's interior. Tokio, 1984. 653 p.

Поступила в редакцию  
5 мая 2005 г.

УДК 549.283

ЗРМО, № 5, 2005 г.  
Zapiski RMO, N 5, 2005

© Д. чл. В. П. САМУСИКОВ

## САМОРОДКИ ЗОЛОТА — МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

V. P. SAMUSIKOV. GOLD NUGGETS: MORPHOLOGICAL PECULIARITIES

Институт алмаза и благородных металлов СО РАН,  
677891, Якутск, пр. Ленина, 39; e-mail: geo@yakutia.ru

There are three points of view about origin of gold nuggets: 1) endogen formation; 2) growth in gold placers; 3) formation within weathering crusts, due to dissolution of small sized gold particles. The first concept is the more supported one now, but the question «why gold nuggets are found mostly in gold placers» (more than 90 %, after N. V. Petrovskaya) remains unanswered. For this purpose, the primary documentation was studied