

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА МИКРОАЛМАЗОВ ОКТАЭДРИЧЕСКОГО И КУБИЧЕСКОГО ГАБИТУСА ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ (Якутия) ПО ДАННЫМ ИЗОТОПИИ УГЛЕРОДА И ОСНОВНЫХ ПРИМЕСНЫХ ДЕФЕКТОВ

В.Н. Реутский, Д.А. Зедгенизов

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Микроалмазы (кристаллы менее 1 мм) кубического габитуса из кимберлитовой трубки Удачная имеют волокнистое внутреннее строение и высокое содержание примеси азота (400—3000 г/т). Октаэдрические микроалмазы из того же месторождения отличаются содержанием азота от 0 до 500 г/т и зональным строением. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C} = -4.7\%$ для октаэдров и -4.5% для кубоидов) свидетельствует о едином его источнике для этих морфологических групп. Исследованный комплекс характеристик может быть обусловлен кристаллизацией октаэдров из раствора углерода в расплаве, а кубоидов — в условиях затрудненной диффузии углерода.

Микроалмазы, габитус, механизм роста, изотопы углерода, трубка Удачная, Якутия.

SOME SPECIFIC FEATURES OF GENESIS OF MICRODIAMONDS OF OCTAHEDRAL AND CUBIC HABIT FROM KIMBERLITES OF THE UDACHNAYA PIPE (Yakutia) INFERRED FROM CARBON ISOTOPES AND MAIN IMPURITY DEFECTS

V.N. Reutsky and D.A. Zedgenizov

Microdiamonds (crystals smaller than 1 mm) of octahedral and cubic habit from Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia) have been compared in order to distinguish genetic features inferred from carbon isotopic composition and impurity defects. Microdiamonds of cubic habit from the Udachnaya kimberlite pipe have a fibrous internal structure and a high content of nitrogen impurity (400–3000 ppm). Octahedral microdiamonds from the same deposit are distinguished by a low nitrogen content of 0 to 500 ppm and zoning structure. The isotopic composition of carbon ($\delta^{13}\text{C}$ is -4.7% for octahedra and -4.5% for cuboids) suggests a common source of carbon for these morphologic groups. The studied characteristics can be due to crystallization of octahedra from carbon dissolved in the melt, and cuboids, under the conditions of the hampered diffusion of carbon.

Microdiamonds, crystal habit, growth mechanism, carbon isotopes, Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia

ВВЕДЕНИЕ

Основными формами роста кристаллов природных алмазов являются октаэдр и кубоид (кривогранная форма роста, внешне напоминающая куб) [Sunagawa, 1984; Непша, Клюев, 1990]. Предполагается, что механизм и кинетика образования таких кристаллов различны. Кристаллы кубического габитуса крайне редко встречаются среди алмазов крупнее 6 мм. Заметное увеличение количества кристаллов кубического габитуса является отличительной особенностью алмазов мелких классов крупности (-1 мм), описываемых в современной литературе как микроалмазы.

На материале из кимберлитов Якутии и Австралии показано [Траутман и др., 1997], что морфология и физические свойства микроалмазов весьма разнообразны даже в пределах одного месторождения, что свидетельствует о разнообразии физико-химических условий их кристаллизации. Комплексными исследованиями микроалмазов из тр. Удачная установлено [Непша, Клюев, 1990; Зедгенизов и др., 1998а,б; Зедгенизов и др., 1999; Реутский, Зедгенизов, 2001], что минеральные включения в них характеризуются большим разнообразием составов, а сам алмаз статистически обогащен изотопом ^{13}C в сравнении с макрокристаллами из того же месторождения. На уровне своего класса крупности кубические и октаэдрические микрокристаллы алмаза в тр. Удачная существенно отличаются внутренним строением и дефектно-примесным составом [Непша, Клюев, 1990; Зедгенизов и др., 1998б, 1999].

Настоящая работа посвящена сравнению изотопного состава углерода и дефектно-примесного состава микрокристаллов октаэдрического и кубического габитуса из кимберлитовой тр. Удачная и анализу возможных причин возникновения комплекса изученных характеристик.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА

Нами проанализирован изотопный состав углерода 46 микрокристаллов алмаза из кимберлитовой тр. Удачная. Среди них 20 образцов представлены кристаллами октаэдрического и 26 — кубического габитуса. По классификации алмазов Ю.Л. Орлова [1973], исследованные октаэдрические кристаллы относятся к I минералогической разновидности, а кубоиды — к III. Помимо изотопного состава углерода

во всех образцах были детально изучены особенности морфологии и внутреннего строения, а также дефектно-примесный состав.

Характеристика примесных центров в микроалмазах приведена на основании изучения спектров ИК поглощения, полученных на спектрофотометре Perkin-Elmer-325 с помощью приставки для микрообразцов. Для исследования были отобраны кристаллы естественной огранки. Обработка полученных данных выполнена посредством метода, предложенного авторами работ [Woods, 1986; Непша, Клюев, 1990], с учетом поверхностного фона рассеяния, существенно влияющего на пропускание образцов естественной огранки. Определение коэффициента поглощения проведено по формулам, предложенным В.И. Непшей, Ю.А. Клюевым [1990].

Для определения изотопного состава углерода алмаз переводили в форму CO₂ путем прогрева образца (900 °С) в вакуумированном кварцевом реакторе в присутствии CuO и платинового катализатора. Эксперименты проведены на оборудовании и по методике, описанной ранее [Реутский и др., 1999]. Отношение изотопов углерода измерено на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta. Ошибка полученных значений $\delta^{13}\text{C}$ для стандарта графита USGS-21, включая процедуру пробоподготовки, составляет не более 0.2 ‰ (1 σ). В связи с малыми размерами кристаллов проведение повторных измерений образцов невозможно. Все данные приведены относительно стандарта VPDB.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Изотопные характеристики углерода микроалмазов разного габитуса, полученные в рамках настоящей работы, а также опубликованные данные [Kinny et al., 1999], приведены в таблице. В ней также даны содержания примеси азота, определенные по данным ИК-спектроскопии. Характеристические ИК-спектры микроалмазов октаэдрического и кубического габитуса приведены на рис. 1.

Морфология, изотопный состав углерода и содержание примеси азота в микрокристаллах алмаза из тр. Удачная

Октаэдр			Кубоид		
Образец	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	N, г/т	Образец	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	N, г/т
UDD-1	-5.3	0	Уд	-4.0	812
UDD-2	-7.2	0	Удц-13	-4.6	1025
UDD-3	-6.5	347	КУ-1	-4.8	1310
UDD-4	-5.7	0	КУ-2	-4.8	785
UDD-5	-2.8	128	КУ-3	-3.8	925
UDD-7	-4.5	304	КУ-4	-4.6	887
UDD-9	-6.2	0	КУ-5	-3.9	716
UDD-11	-4.6	0	КУ-6	-3.2	1102
UDD-12	-4.7	33	КУ-11	-5.2	1562
UV-8DG	-3.7	78	КУ-12	-5.7	1071
02-8	-5.0	156	КУ-13	-4.7	845
02-101	-4.1	215	КУ-14	-4.4	901
02-102	-5.8	431	КУ-15	-5.6	917
02-103	-2.8	369	КУ-16	-5.4	692
02-104	-5.1	0	КУ-17	-5.2	856
01/4	-6.7	530	КУ-18	-4.1	1112
01/41	-4.8	313	КУ-19	-2.1	874
01/43	-5.7	517	КУ-20	-5.2	931
01/45	-4.6	0	КУ-21	-4.3	852
01/5	-4.3	165	КУ-22	-3.5	735
UD028*	-6.2	—	КУ-23	-4.9	1036
UD081*	-3.5	—	02-169	-4.0	1421
UD099*	-4.2	—	02-112	-5.5	606
UD109*	-4.7	—	02-203	-6.0	792
UD265*	-0.9	—	02-210	-2.5	590
UD293*	-3.3	—	III/5	-4.4	1072
UD299*	-5.2	—	UD131*	-4.8	—
UD494*	-3.3	—	UD152*	-2.0	—
			UD528*	-6.1	—

* Данные из [Kinny et al., 1999].

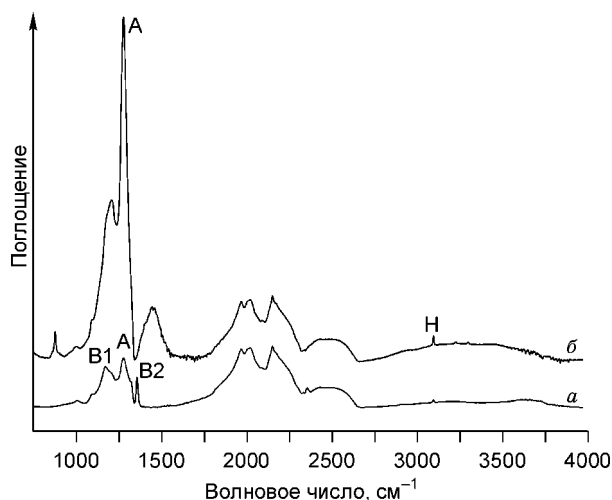


Рис. 1. Характеристические ИК-спектры микроалмазов октаэдрического (*a*) и кубического (*б*) габитуса.

Рассчитанный на основе всех имеющихся данных средний изотопный состав углерода микрокристаллов алмаза из тр. Удачная составил -4.6‰ , что соответствует общепринятому значению $\delta^{13}\text{C}$ для углерода мантии. Как отмечалось нами ранее [Реутский, Зедгенизов, 2001], эта величина значительно отличается от среднего изотопного состава углерода макрокристаллов алмаза из того же месторождения (-6.2‰) [Галимов, 1984], однако практически не отличается от средних данных для алмазов из эклогитов тр. Удачная [Snyder et al., 1995], включающих кубические микроалмазы. Изученные авто-

рамы работы [Snyder et al., 1995] алмазы, аналогично микрокристаллам настоящей работы, характеризуются узким диапазоном величин $\delta^{13}\text{C}$, типичным примерно для 40 % алмазов эклогитового типа (Э-типа), аналогичных перидотитовым алмазам [Соболев и др., 1979].

Преобладающими азотными дефектами в микроалмазах октаэдрического габитуса являются А и В1. Концентрация азота в этих кристаллах невелика и, как правило, не превышает 500 г/т. При этом часть кристаллов, по данным ИК-спектроскопии, относятся к типу безазотных алмазов (IIa тип). Соотношение А- и В1-дефектов ($\%B1 = (B1 \cdot 100) / (A + B1)$) для азотсодержащих микрокристаллов составляет более 50 %. Для микроалмазов кубического габитуса характерно присутствие азотных сегрегаций только в форме А-дефектов. При этом для кубоидов характерно повышенное по сравнению с октаэдрами содержание азотных центров (400—3000 г/т). Дополнительной характеристикой кубоидов также является постоянное присутствие примеси водорода.

Морфологические особенности кристалла являются индикатором условий образования. К настоящему времени это наиболее изученные свойства алмаза [Орлов, 1973; Harris et al., 1975; Sunagawa, 1984; Бартошинский, Квасница, 1991]. В последнее время в связи с совершенствованием методик исследования все больше внимания уделяется изучению внутреннего строения этого минерала. Такой подход позволяет проследить всю историю развития кристалла и соответственно получить наиболее детальную информацию об условиях его образования, включая динамику этих условий в процессе кристаллизации. Как показано ранее [Зедгенизов и др., 1998б, 1999], октаэдрические и кубические микрокристаллы алмаза значительно отличаются особенностями внутреннего строения. Для октаэдрических кристаллов характерно наличие выраженных зон роста, проявляющихся в катодоллюминесценции (рис. 2) и свидетельствующих о последном росте кристаллов. Кубические микрокристаллы имеют волокнистое внутреннее строение (см. рис. 2), что указывает на нормальный механизм роста алмаза. Для кубических микрокристаллов характерно общее высокое содержание примесей, в частности азота (см. таблицу), и дефектов кристаллической структуры в сравнении с октаэдрическими. Полученное компактное распределение величин $\delta^{13}\text{C}$ и неотличимые средние их значения для кубических (-4.5‰ ; $\sigma = 1.07$; $n = 29$) и октаэдрических (-4.7‰ ; $\sigma = 1.38$; $n = 28$) микрокристаллов свидетельствуют о полном соответствии изотопных характеристик углерода

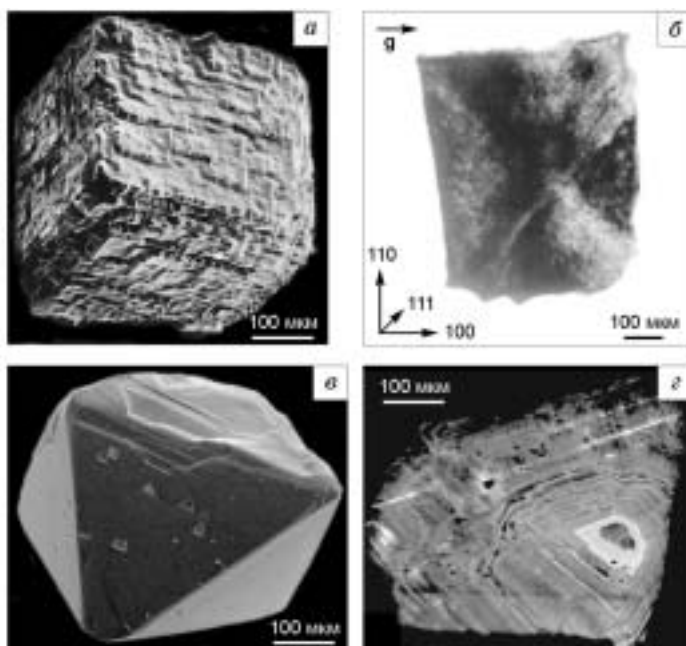
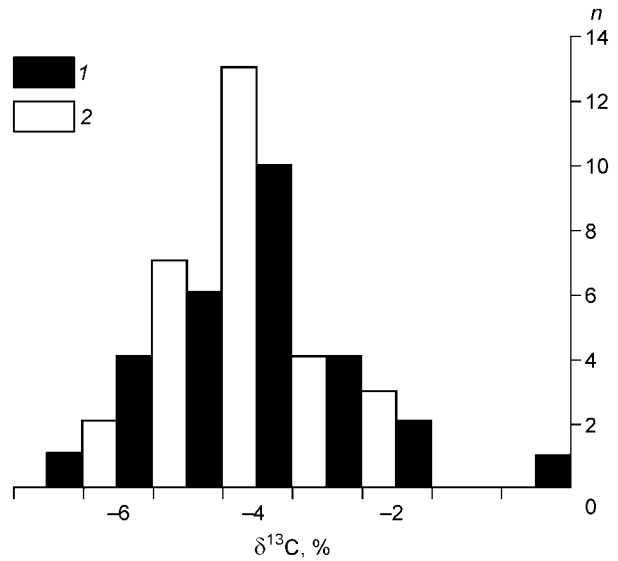


Рис. 2. Типичные морфология и внутреннее строение изученных микрокристаллов алмаза из тр. Удачная.

a, б — кубического габитуса; *в, г* — октаэдрического габитуса. Символ *g* — вектор дифракции.

Рис. 3. Гистограмма значений $\delta^{13}\text{C}$ микрокристаллов алмаза из тр. Удачная.

1 — октаэдр; 2 — кубоид.



этих двух разновидностей микроалмазов в тр. Удачная (рис. 3). Таким образом, мы можем предполагать, что исследованные морфологические группы микроалмазов образованы благодаря единому источнику углерода, но в существенно разных условиях среды кристаллизации, которые обусловили в разной степени благоприятные условия для захвата примесей и реализацию разных механизмов роста кристаллов.

По мнению П. Картины с соавторами [Cartigny et al., 2001], существенно различное содержание примеси азота в алмазах с близким изотопным составом углерода указывает, в первую очередь, на разную скорость их роста (рис. 4). Исследованные нами микрокристаллы находятся в $\delta^{13}\text{C} - \text{N}$ области, наи-

более характерной для природных алмазов. Поле, образованное октаэдрическими кристаллами, расположено строго под полем кубических образцов. Такое расположение, согласно построениям авторов работы [Cartigny et al., 2001], свидетельствует о более высокой скорости роста кубических кристаллов по сравнению с октаэдрическими. Однако скорость роста существенно влияет на разделение вещества между средой и кристаллом и, в частности, на величину изотопного фракционирования [Dubinina, Lakshtanov, 1997; Lemarchand et al., 2004; Watson, 2004]. Влияние скорости роста на фракционирование изотопов углерода между растущим алмазом и средой кристаллизации рассматривается как фактор, обуславливающий, по крайней мере, внутреннюю изотопную неоднородность кристаллов алмаза [Boyd et al., 1994; Cartigny et al., 2001; De et al., 2001; Maruoka et al., 2004]. Показано, что в алмазе смешанного кубоктаэдрического габитуса зоны роста в секторе кубоида систематически обеднены тяжелым изотопом углерода по сравнению со смежными зонами в октаэдрическом секторе на 1 ‰ [Zedgenizov, Harte, 2004]. В этой связи полученное нами полное соответствие изотопного состава углерода кубических и октаэдрических микрокристаллов алмаза из тр. Удачная может свидетельствовать об отсутствии существенных различий в скорости роста кристаллов.

Наблюдаемая четкая корреляция содержания примеси азота и механизма роста кристаллов указывает на тесную взаимосвязь этих параметров. Согласно существующим представлениям, механизм роста кристаллов определяется величиной пересыщения среды углеродом [Чернов, 1971]. При малом пересыщении реализуется слоисто-спиральный механизм роста, с увеличением пересыщения он сменяется послойным. При дальнейшем возрастании пересыщения среды кристаллизации углеродом рост происходит по нормали к фронту кристаллизации — нормальный механизм роста кристалла. На основе взаимозависимости морфологии кристаллов, степени пересыщения среды углеродом и механизма роста была предложена морфологическая классификация природных алмазов [Sunagawa, 1984]. Согласно данной классификации выделяются: 1 — монокристаллы, основной габитусной формой роста которых является октаэдр, 2 — алмазы в „оболочке“, имеющие монокристаллическое ядро, как правило, октаэдрической морфологии и волокнистую оболочку, 3 — кубоиды с волокнистой структурой, 4 — поликристаллические агрегаты, имеющие либо мелкозернистую, либо криптокристаллическую текстуру. В данной схеме выделяемые морфологические группы расположены в соответствии с увеличением степени пересыщения среды углеродом и, по мнению автора классификации, с увеличением скорости роста кристаллов (рис. 5). Преобладающей

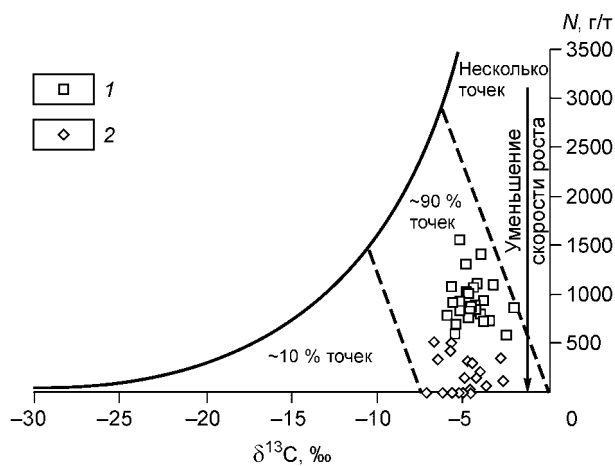


Рис. 4. Соотношение изотопного состава углерода с содержанием примеси азота в изученных микроалмазах из тр. Удачная.

1 — кубоид; 2 — октаэдр. Линиями показаны ключевые тренды, выявленные на основе более 1200 определений [Harris et al., 1975].



Рис. 5. Зависимость морфологии кристаллов и механизма роста алмаза от степени пересыщения среды углеродом и скорости роста алмаза [Sunagawa, 1984].

σ^* и σ^{**} — условные пороговые величины пересыщения среды углеродом; R — скорость роста.

группой среди микроалмазов из кимберлитовой тр. Удачная являются монокристаллы. Рост октаэдрических алмазов происходит по механизму слоисто-спирального или послойного роста. По мнению Г.П. Булановой и др. [1993], наиболее вероятно формирование таких кристаллов из раствора углерода в расплаве низкого пересыщения, где имелось достаточно пространства для свободного массопереноса углерода.

Кубические кристаллы образуются при значительно больших пересыщениях и, при прочих равных условиях, должны характеризоваться значительно более высокими скоростями роста. Однако образование кубоидов может являться следствием роста кристаллов в диффузионном режиме, т. е. в отсутствии флюидного потока. В этом случае скорость роста лимитируется скоростью диффузии, обеспечивающей поступление вещества к фронту роста. При таком режиме питания растущего кристалла происходит потеря устойчивости гранных форм монокристаллов и превращение их в дендрит, чем и обуславливается волокнистый рост кубоидов. Диффузионный режим питания кристалла также препятствует уходу из области фронта кристаллизации примесей и соответственно способствует их захвату кристаллом, что согласуется с полученными данными. Таким образом, можно предположить, что рост кубов происходит в условиях затрудненной диффузии. При этом объективная скорость роста кубоида не обязательно будет отличной от таковой октаэдра. Очевидно, что режим роста будет зависеть от фазового состояния среды кристаллизации. Смена фазового состояния среды, при кристаллизации или плавлении субстрата, влечет за собой изменение степени пересыщения, а также режима питания кристалла и, в конечном итоге, механизма роста минерала [см., например, Taylor, Green, 1989]. Таким образом, наряду с пересыщением, фазовое состояние среды кристаллизации алмаза может играть решающую роль в реализации того или иного механизма роста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных комплексных исследований микрокристаллов алмаза октаэдрического и кубического габитуса из тр. Удачная мы можем сделать следующие выводы.

1. Октаэдрические микрокристаллы алмаза характеризуются сравнительно низким содержанием примеси азота (500—0 г/т) и изотопным составом углерода, соответствующим средним мантийным значениям (–4.7 ‰; $\sigma = 1.38$). Особенности внутреннего строения кристаллов свидетельствуют о послойном росте изученных образцов.

2. Для микроалмазов кубического габитуса характерно более высокое содержание примеси азота (400—3000 г/т). Отношение изотопов углерода в них также соответствует мантийным значениям (–4.5 ‰; $\sigma = 1.07$). Волокнистая структура кристаллов свидетельствует о нормальном механизме роста этих микроалмазов.

3. Сравнение комплекса характеристик микрокристаллов различного габитуса из тр. Удачная позволяет сделать вывод о незначительном влиянии механизма (кинетики) роста на изотопный состав углерода кристаллов, в то время как именно кинетический фактор является определяющим при захвате примеси азота.

4. Мы полагаем, что в данном случае реализованный механизм роста и морфология микрокристаллов алмаза являются следствием разного фазового состояния среды кристаллизации. Кубоиды кристаллизовались в условиях затрудненной диффузии при отсутствии флюидного потока или расплава. Октаэдрические кристаллы образованы в условиях всестороннего равномерного питания, вероятнее всего, из раствора углерода в расплаве. При этом параметры, прямо влияющие на изотопное фракционирование углерода (температура, давление, скорость роста алмаза), существенно не отличались.

Авторы благодарят анонимных рецензентов за конструктивные замечания при подготовке рукописи к печати.

Работа выполнена при поддержке фонда Президента РФ (грант МК-1539.2005.5).

ЛИТЕРАТУРА

- Бартошинский З.В., Квасница В.Н.** Кристалломорфология алмаза. Киев, Наук. думка, 1991, 172 с.
- Буланова Г.П., Барашков Ю.П., Тальникова С.Б., Смелова Г.Б.** Природный алмаз — генетические аспекты. Новосибирск, Наука, 1993, 167 с.
- Галимов Э.М.** Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // Геохимия, 1984, № 8, с. 1091—1117.
- Зедгенизов Д.А., Логвинова А.М., Шацкий В.С., Соболев Н.В.** Включения в микроалмазах из некоторых кимберлитовых трубок Якутии // Докл. РАН, 1998а, т. 359, № 1, с. 74—78.
- Зедгенизов Д.А., Федорова Е.Н., Шацкий В.С.** Микроалмазы из кимберлитовой трубки Удачная // Геология и геофизика, 1998б, т. 39 (6), с. 745—753.
- Зедгенизов Д.А., Рылов Г.М., Шацкий В.С.** Внутреннее строение микроалмазов из кимберлитовой трубки Удачная // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (1), с. 113—120.
- Непша В.И., Клюев Ю.А.** Алмазные теплоотводы в электронных приборах // Алмаз в электронной технике. М., Энергоатомиздат, 1990, с. 140—155.
- Орлов Ю.Л.** Минералогия алмаза. М., Наука, 1973, 267 с.
- Реутский В.Н., Зедгенизов Д.А.** Изотопный состав углерода микрокристаллов алмаза из трубки Удачная (Якутия) // Кристаллогенезис и минералогия: Материалы международной конференции, СПб., 2001, с. 318—319.
- Реутский В.Н., Логвинова А.М., Соболев Н.В.** Изотопный состав углерода поликристаллических агрегатов алмаза, содержащих включения хромита, из кимберлитовой трубки Мир, Якутия // Геохимия, 1999, № 11, с. 1191—1196.
- Соболев Н.В., Галимов Э.М., Ивановская И.Н., Ефимова Э.С.** Изотопный состав углерода алмаза, содержащих кристаллические включения // Докл. АН СССР, 1979, т. 249, № 5, с. 1217—1220.
- Траутман Р.Л., Гриффин Б.Дж., Тэйлор В.Р., Специс З.В., Смит К.Б., Ли Д.К.** Сравнение микроалмазов из кимберлитов и лампроитов Якутии и Австралии // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 323—326.
- Чернов А.А.** Теория устойчивости гранных форм кристаллов // Кристаллография, 1971, т. 16, вып. 4, с. 842—863.
- Boyd S.R., Pineau F., Javoy M.** Modelling the growth of natural diamonds // Chem. Geol., 1994, v. 116, p. 29—42.
- Cartigny P., Harris J.W., Javoy M.** Diamond genesis, mantle fractionations and mantle nitrogen content: a study of $\delta^{13}\text{C}$ – N concentrations in diamonds // Earth Planet. Sci. Lett., 2001, v. 185, p. 85—98.
- De S., Heaney P.J., Vicenzi E.P., Wang J.** Chemical heterogeneity in carbonado, an enigmatic polycrystalline diamond // Earth Planet. Sci. Lett., 2001, v. 185, p. 315—330.
- Dubinina E.O., Lakshtanov L.Z.** A kinetic model of isotopic exchange in dissolution-precipitation processes // Geochim. Cosmochim. Acta, 1997, v. 61, p. 2265—2273.
- Harris J.W., Hawthorne J.B., Oosterveld A.** A classification scheme for diamonds and comprehensive study of South African diamond characteristics // Phys. Chem. Earth, 1975, v. 9, p. 765—783.
- Kinny P.D., Trautman R.L., Griffin B.J., Harte B.** Carbon isotopic analysis of microdiamonds // Proc. 7th Int. Kimb. Conf., V. 1. Cape Town, 1999, p. 429—436.
- Lemarchand D., Wasserburg G.J., Papanastassiou D.A.** Rate-controlled calcium isotope fractionation in synthetic calcite // Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, v. 68, p. 4665—4678.
- Maruoka T., Kurat G., Dobosi G., Koeberl C.** Isotopic composition of carbon in diamonds of diamondites: record of mass fractionation in the upper mantle // Ibid., p. 1635—1644.
- Snyder G.A., Taylor L.A., Jerde E.A., Clayton R.N., Mayeda T.K., Deines P., Rossman G.R., Soboлев N.V.** Archean mantle heterogeneity and the origin of diamondiferous eclogites, Siberia: evidence from stable isotopes and hydroxyl in garnet // Amer. Miner., 1995, v. 80, p. 799—809.
- Sunagawa I.** Morphology of natural and synthetic diamond crystals // Materials Science of Earth's Interior. Tokyo, TERRA PUB, 1984, p. 303—330.
- Taylor W.R., Green D.H.** The role of reduced C-O-H fluids in mantle partial melting // Kimberlites and related rocks. GSA Special Publication № 14, 1989, v. 1, p. 592—602.
- Watson E.B.** A conceptual model for near-surface kinetic controls on the trace-element and stable isotope composition of abiogenic calcite crystals // Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, v. 68, p. 1473—1488.
- Woods G.S.** Platelets and infrared absorption of type Ia diamonds // Proceedings of Royal Society. London, 1986, A407, p. 219—238.
- Zedgenizov D.A., Harte B.** Microscale variations of $\delta^{13}\text{C}$ and N content in diamonds with mixed-habit growth // Chem. Geol., 2004, v. 205, p. 169—175.