

Влияние химического состава кимберлитов и лампроитов на кристалломорфологию алмаза

В.С.ШКОДЗИНСКИЙ, З.А.АЛТУХОВА

В настоящее время наиболее распространена гипотеза ксеногенного происхождения алмаза в кимберлитах и лампроитах. Предполагается, что исходные магмы этих пород лишь транспортировали алмазы, захваченные из мантийных перидотитов и эклогитов, поэтому состав магм не влиял на его кристалломорфологию. Однако с ксеногенной гипотезой не согласуются: присутствие расплавных включений в некоторых алмазах [22], иногда устанавливаемый синкимберлитовый изотопный возраст минеральных включений в них [20, 24], присутствие включений карбонатов и раскристаллизованных карбонатитовых расплавов [22], типичных для кимберлитов и не характерных для мантийных ксенолитов и др. [3, 19]. Особенно показательно сонахождение перидотитового и эклогитового парагенезисов в одних и тех же кристаллах [21, 8]. В связи с невозможностью перемещений алмазов в твердой мантии из эклогитов в перидотиты и обратно такое сонахождение свидетельствует о формировании перидотитового и эклогитового парагенезисов включений на разных стадиях роста алмазов в процессе эволюции среды алмазообразования. В высокотемпературных условиях мантии наиболее реальной средой минералообразования, эволюционирующей по составу и температуре, является расплав.

По современным данным [25, 2], морфология кристаллов алмаза определяется степенью пересыщения среды углеродом. При небольшом пересыщении атомы углерода присоединяются в основном к существующим ступеням роста, т.к. здесь присутствует наибольшее число свободных валентных связей. Таким путем формировались плоскогранные октаэдры в результате тангенциального последнего роста. В случае больших пересыщений атомы присоединяются ко всей поверхности граней, происходит радиальный рост с образованием других форм кристаллов. При магматическом происхождении алмаза увеличение кремнекислотности и связанной с ней вязкости расплавов должно приводить к уменьшению скорости диффузии и диффузионного стока углерода в формирующиеся алмазы, росту пересыщения расплава углеродом и смене октаэдрической огранки кристаллов ромбододекаэдрической и кубической. Анализ опубликованных данных по 21 трубке России подтвердил существование подобных зависимостей [19]. Приведем результаты изучения влияния не только содержания кремнекислоты, но и других химических компонентов на кристалломорфологию и некоторые физические свойства алмазов на примере 59 трубок России, Африки, Канады и Австралии [1, 4, 5, 7, 9—12, 15—18, 23], а также данные авторов по 7 петрографическим разновидностям кимберлитов трубок Удачная-Западная и Удачная-Восточная.

При построении рис. 1 и других использованы опубликованные данные по трубкам Якутской кимберлитовой провинции: Мир, Интернациональная, XXIII Съезда КПСС, Амакинская, Таежная, Ботуобинская, Нюрбинская,

Удачная-Западная, Удачная-Восточная, Дальняя, Иреляхская, Зарница, Попугаевой, Электра, Айхал, Юбилейная, Сытыканская, Комсомольская, Краснопресненская, Молодость, Радиогеодезическая, Заполярная, Поисковая, Малокуонапская, Заря, Ленинградская, Университетская, Аэрогеологическая, Дьянга, Русловая; Архангельской кимберлитовой провинции: Гриба, Поморская, Ломоносовская, Архангельская, Карпинского-1, Карпинского-2, Снегурочка, Пионерская, Кольцовская, Первомайская; по туффизитам Вишерского Урала: Ефимовка и Волюнка; по трубкам Австралии: Аргайл, Эллендейл-4; Африки: Катокка, Антошка, Премьер, Финш, Де-Бирс, Весселтон, Кофффонтейн, Булфонтейн, Дьюйтспен, Камафука-Камазамбо, Мвадуи, Слоан; Канады: Лесли, Панда, Коала, Снэп-Лейк; а также данные авторов по 7 петрографическим разновидностям в трубках Удачная-Западная и Удачная-Восточная.

Установлено, что содержание октаэдров (см. рис. 1, А), суммы октаэдров и переходных разностей (см. рис. 1, Б) отчетливо уменьшаются, а содержание суммы ромбододекаэдров и додекаэдроидов (рис. 1, В) и округлых додекаэдроидов (см. рис. 1, Г) увеличивается с ростом кремнекислотности вмещающих кимберлитов и лампроитов, что согласуется с полученными ранее выводами. Относительно большой разброс точек около линий регрессии на рис. 1, А, Б, В (коэффициент корреляции r и ошибки коэффициента корреляции m , соответственно 0,42; 0,53; 0,45) частично связан с некоторой разнородностью исходных данных по алмазам, т.к. зарубежные исследователи, в отличие от российских, обычно не выделяют кристаллы, переходные от октаэдров к другим формам, и округлые додекаэдроиды в качестве самостоятельных разностей. При построении рис. 1, Г использовались данные только российских исследователей [10, 1, 16], поэтому величина коэффициента корреляции для него высокая (r 0,70).

Разброс точек на диаграммах может быть обусловлен также содержанием в кимберлитах и лампроитах ксеногенного материала и неточностью некоторых подсчетов содержания морфологических разновидностей алмаза, т.к. результаты этих подсчетов различными исследователями для одних и тех же трубок иногда не совпадают. В этом случае учитывались данные, полученные на более представительном материале (обычно по нескольким тысячам кристаллов). При примерно одинаковой представительности использовались средние арифметические величины из данных различных исследователей, но главной причиной разброса может быть влияние содержания других химических компонентов, кроме кремнекислоты, на вязкость кимберлитовых и лампроитовых расплавов.

Из теории расплавов [13] следует, что их вязкость повышают катионы сеткообразователи (Si^4 , P^5 , Li^4) и понижают катионы модификаторы (Mg^2 , Fe^2 , Ca^2 , Na , K).

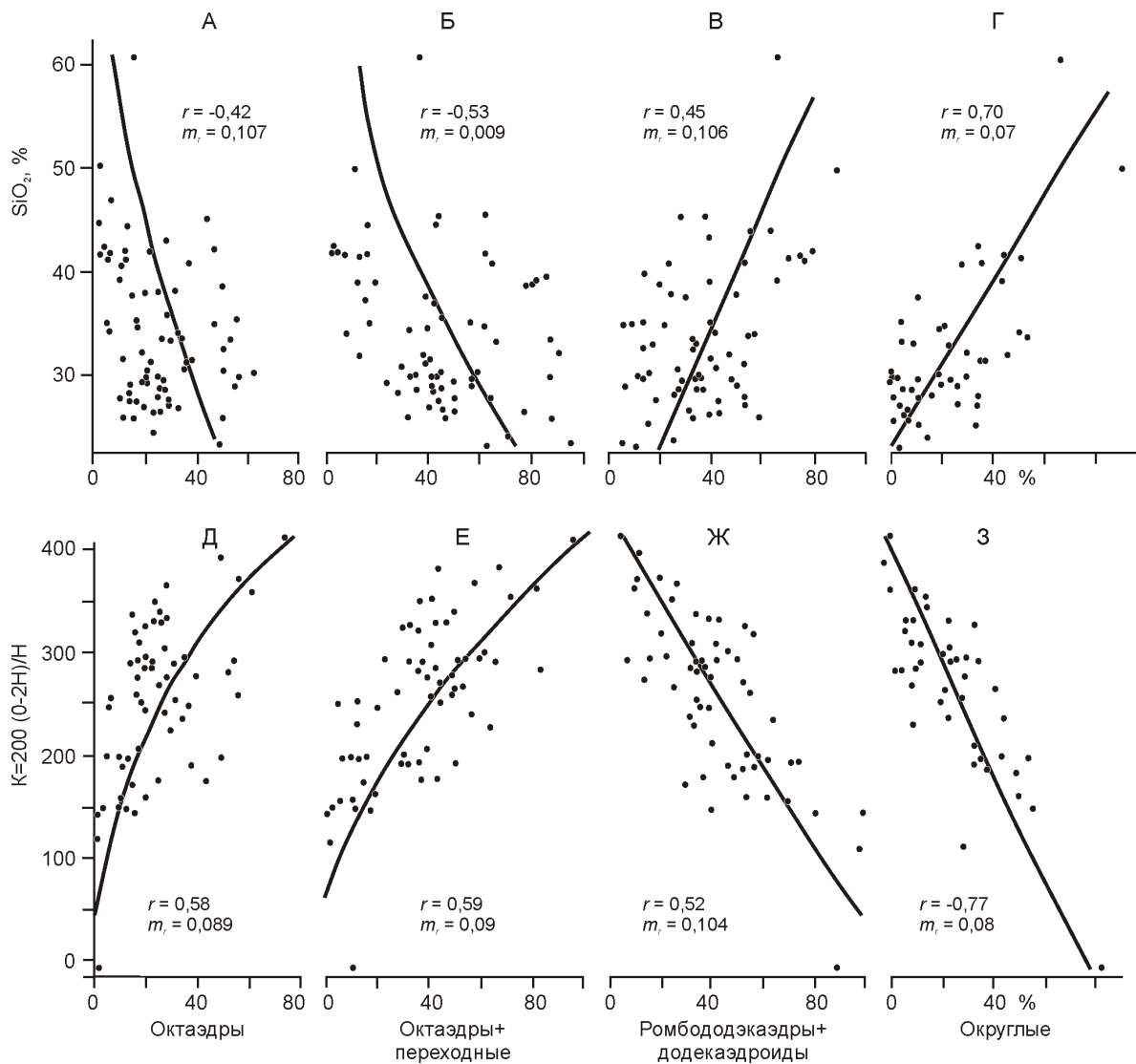


Рис. 1. Зависимость содержаний различных морфологических типов кристаллов алмаза от среднего содержания кремнекислоты в кимберлитовых и лампроитовых грубках (А—Г) и величины структурного параметра их исходных расплавов (Д—З)

Амфотерные катионы Al^{3+} , Fe^{3+} в зависимости от состава расплавов могут играть роль модификаторов или сеткообразователей. В природных магмах они обычно являются сеткообразователями. В кимберлитовых и лампроитовых магмах содержание кремнекислоты обычно 20—45%. Второй по распространенности компонент MgO (15—38%), увеличение его количества в соответствии с теорией расплавов должно уменьшать их вязкость и, следовательно, приводить к возрастанию в кимберлитах и лампроитах содержания октаэдров за счет других форм кристаллов алмаза. Как видно из рис. 2, А, в кимберлитах с близкими содержаниями кремнекислоты (28—32%) при увеличении количества MgO от 25 до 36 % содержание октаэдров в среднем повышается от 14 до 60%.

Увеличение содержаний воды и углекислоты также сильно уменьшает вязкость расплавов [13], что должно приводить к росту количества октаэдрических кристаллов алмаза. Действительно, в кимберлитах с близкими содержаниями SiO_2 (28—32%) и суммы MgO и CaO (35—37%) возрастание углекислоты или потерь при прокаливании на 10% увеличивает количество октаэдров примерно на 44% (см. рис. 2, Б и В). При незначительном содержании CaO скачкообразно

возрастает количество кубов (см. рис. 2, Г), что указывает на высокую вязкость малоизвестковистых расплавов и согласуется с принадлежностью Ca^{2+} к модификаторам. Существование таких зависимостей свидетельствует о влиянии всех химических компонентов на вязкость расплавов и необходимости учета этого влияния на кристалломорфологию алмаза в кимберлитах и лампроитах.

Согласно теории расплавов [13], зависимость их вязкости (η) от состава, температуры и давления имеет вид

$$\lg \eta = [27 \cdot 10^3 \exp(0,085K) - 47K - 42,2 \cdot 10^3] (4,756T)^{-1} - 3,5 \lg P,$$

где $K = 200(O - 2H)/H$ — структурный параметр, отражающий влияние состава расплава на вязкость; O — число грамм-ионов кислорода в 10^3 , H — число грамм-ионов сеткообразователей 10^3 , β — пьезокоэффициент вязкости, равный для недосыщенных водой расплавов $1,2 \cdot 10^3 \text{ Па}$. Легче всего учесть влияние структурного параметра расплава, т.к. оценить температуру и давление в глубинных частях различных трубок очень сложно. К сожалению, в большинстве химических анализов кимберлитов и лам-

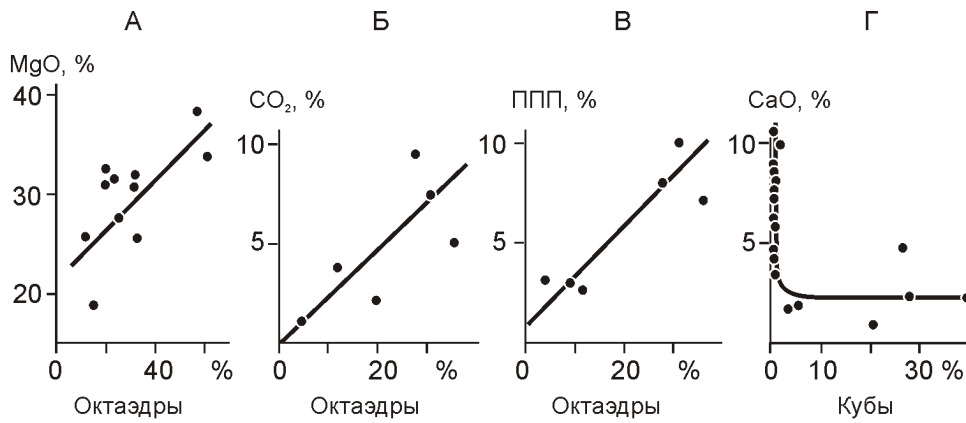


Рис. 2. Зависимость содержаний октаэдров от среднего содержания MgO (А), CO₂ (Б) и потерь при прокаливании (В) в породах трубок и содержания кубов от количества CaO (Г)

проитов не приведены содержания воды и углекислоты, поэтому эти химические компоненты не учитывались при вычислении значений структурного параметра. В случаях, когда приводится суммарное содержание двух и трехвалентного железа, при расчетах принимается, что количество трехвалентного железа в 2 раза выше, чем двухвалентного на основании оценок средней величины отношения этих компонентов в полных анализах. Пример расчета структурного параметра расплава приведен в работе [13].

Величина структурного параметра расплава, рассчитанная даже без учета влияния воды и углекислоты, гораздо лучше коррелируется с содержанием различных форм кристаллов алмаза, чем количество кремнекислоты. Значение коэффициента корреляции величины структурного параметра с содержанием октаэдров равно 0,58 (см. рис. 1, Д), а коэффициента корреляции количества кремнекисло-

ты с этим содержанием 0,42 (см. рис. 1, А). Для суммы октаэдров и переходных разностей алмазов эти значения соответственно равны 0,59 и 0,53 (см. рис. 1, Е и Б), для суммы ромбододекаэдров и додекаэдров 0,52 и 0,45 (см. рис. 1, Ж и В), для округлых кристаллов 0,77 и 0,70 (см. рис. 1, З и Г).

Степень пересыщения расплавов углеродом, обусловленная величиной вязкости, должна оказывать влияние на степень совершенства кристаллической структуры образующихся алмазов и, следовательно, на их физические свойства. Такое влияние, хотя и слабо выраженное, действительно намечается для содержания кристаллов с включениями (рис. 3, А), количества окрашенных (см. рис. 3, Б), целых (нераздробленных) кристаллов (см. рис. 3, В), двойников (см. рис. 3, Г), нелюминесцирующих (см. рис. 3, Д),

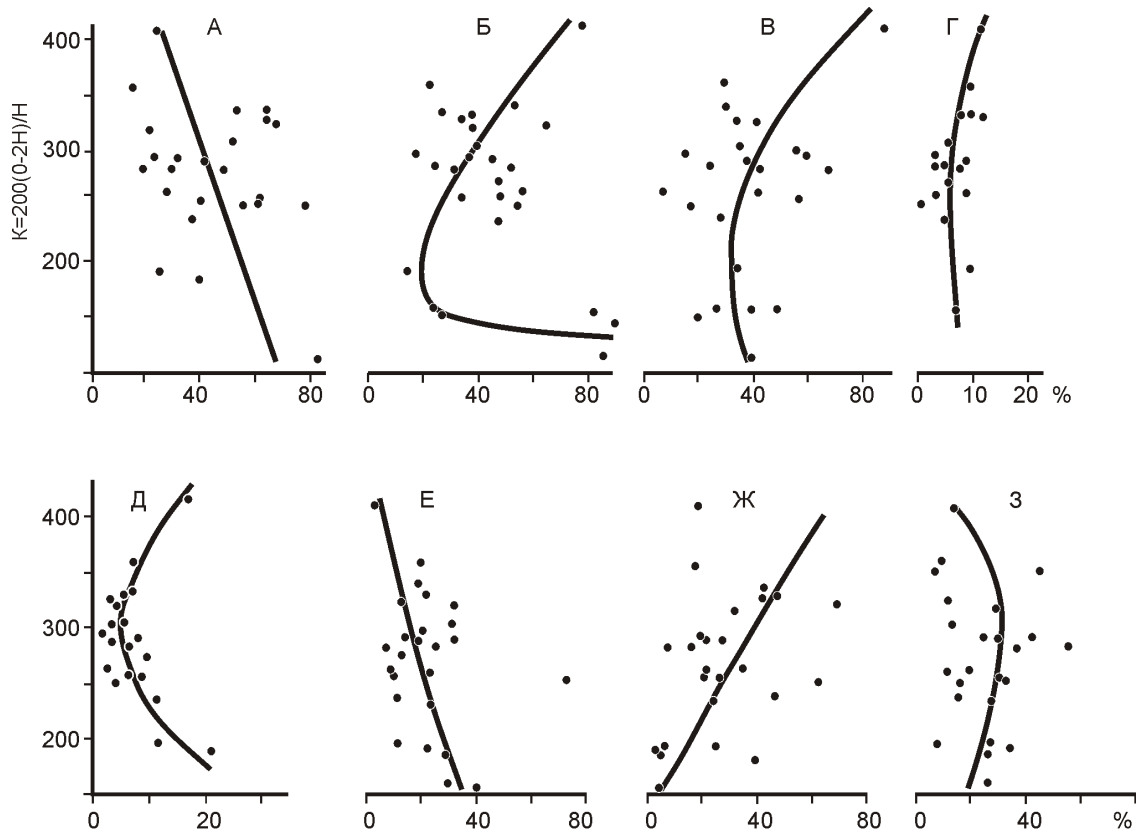


Рис. 3. Зависимость содержаний алмазов с включениями (А), окрашенных (Б) и целых (В) кристаллов, двойников (Г), нелюминесцирующих кристаллов (Д) и имеющих желто-зеленую (Е), сине-голубую (Ж) и розово-сиреневую (З) люминесценцию в трубках от величины структурного параметра исходных расплавов

люминесцирующих желто-зеленым (см. рис. 3, Е), розово-сиреневым (см. рис. 3, Ж) и сине-голубым светом (см. рис. 3, З). Содержание алмазов с включениями возрастает при уменьшении величины структурного параметра, что связано с уменьшением скорости диффузии и увеличением пересыщения расплавов углеродом и, вероятно, другими компонентами. Увеличение в данном направлении содержания кристаллов с желто-зеленой люминесценцией и уменьшение сине-голубой отражает увеличение содержания додекаэдров (см. рис. 1, В) и уменьшение октаэдров (см. рис. 1, А), для которых такие цвета характерны. Скорость кристаллизации алмазов сильно зависит также от скорости изменения давления и температуры в расплаве, которые трудно учесть. Неучет этих факторов, по-видимому, обуславливает значительно менее четкую корреляцию структурного параметра с физическими свойствами этого минерала, чем таковую с формой кристаллов.

Установленная связь кристалломорфологии и некоторых физических свойств алмаза с составом кимберлитов и лампроитов и соответствие особенностей такой корреляции характеру влияния вязкости расплава на свойства алмаза свидетельствуют о том, что данный минерал кристаллизовался в расплавах. Как известно, состав расплава сильно изменяется в процессе его образования и кристаллизации, что объясняет обычно большое разнообразие морфологии кристаллов в одной и той же трубке и состава включений в алмазе от перидотитовых и пироксенитовых до эклогитовых, расплавленных карбонатитовых и кислых, флюидно-солевых и флюидных [22].

Включения перидотитового парагенезиса должны захватываться из кристаллизующихся ультраосновных расплавов, эклогитового — из более кремнекислых. В изначально более кремнекислотных расплавах алмаз должен захватывать повышенное количество включений эклогитового парагенезиса, что подтверждает существование прямой зависимости между содержаниями кремнекислоты в кимберлитах и лампроитах и алмаза с включениями эклогитового парагенезиса (рис. 4), преобладанием этого парагенезиса в алмазах из лампроитов (обычно содержащих больше кремнекислоты, чем кимберлиты), а также в додекаэдроидах, присутствующих в повышенных количествах в лампроитах и богатых кремнекислотой кимберлитах (см. рис. 1, Б). С возрастанием содержания октаэдров в кимберлитах количество включений эклогитового парагенезиса в алмазах уменьшается (рис. 5, А), поскольку октаэдры в больших количествах содержатся в бедных кремнекислотой кимберлитах (см. рис. 1, А). К эклогитовому парагенезису относятся включения граната с высоким содержанием СаО, поэтому в бедных кальцием расплавах даже богатых кремнекислотой содержание эклогитового парагенезиса в алмазе пониженное (см. рис. 5, Б). Изменение состава образующихся минералов при плавлении и кристаллизации объясняет случаи сонахождения в одном и том же кристалле алмаза включений перидотитового и эклогитового парагенезисов.

Формирование этих парагенезисов из минералов, кристаллизующихся в расплавах, а не в перидотитах и эклогитах, является причиной расхождения между количественными соотношениями ксенолитов таких пород в трубках и соответствующих парагенезисов включений в алмазе, а также некоторого несоответствия составов минералов в этих породах и во включениях. Например, 93% включений в алмазе лампроитовой трубки Аргайл относится к эклогитовому парагенезису, а мантийные ксенолиты в ней пред-

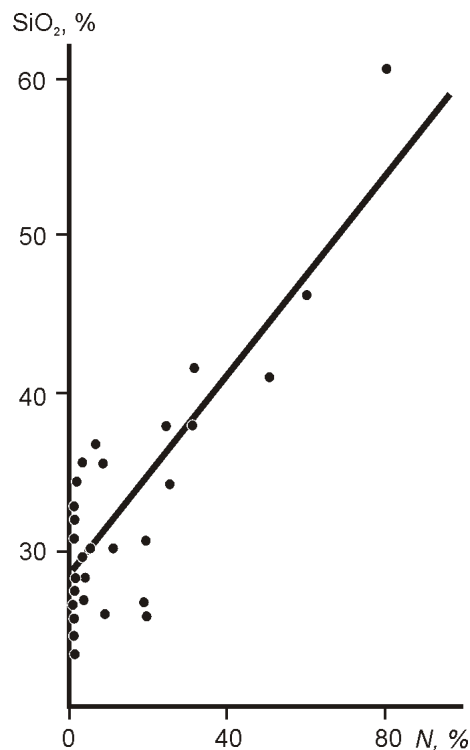


Рис. 4. Зависимость содержаний алмазов с включениями эклогитового парагенезиса N от количества кремнекислоты SiO_2 в кимберлитах и лампроитах со средним содержанием CaO более 5,5%

ставлены только ультраосновными породами [17, 16]. В кимберлитовых же трубках центральной части Сибирской платформы эклогитовый парагенезис составляет менее 1% включений [10], тогда как алмазоносные эклогитовые ксенолиты встречаются примерно в 5 раз чаще, чем алмазоносные перидотитовые [6]. Гранаты в кимберлитах обычно содержат больше кальция, чем в ксенолитах перидоти-

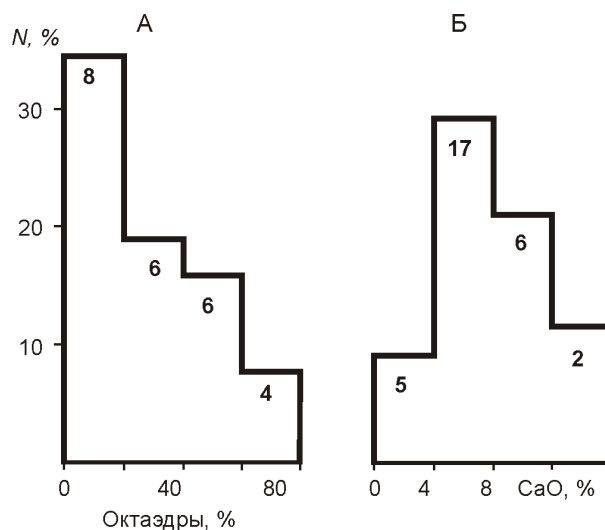


Рис. 5. Средние содержания эклогитового парагенезиса во включениях в алмазе N из кимберлитовых и лампроитовых трубок с различными количествами октаэдров (А) и СаО (Б):

цифры — число использованных определений

тов, и являются более магнезиальными, чем в ксенолитах эклогитов [14]. При магматическом происхождении алмазов эти расхождения — естественное следствие отличия состава кимберлитовых и лампроитовых расплавов от мантийных перидотитов и эклогитов.

Следовательно, результаты проведенных исследований свидетельствуют о существовании зависимости содержания различных морфологических типов кристаллов алмаза и некоторых его физических свойств от состава вмещающих кимберлитов и лампроитов. Характер данной зависимости указывает на ведущую роль влияния вязкости исходных расплавов этих пород на свойства алмаза и магматический генезис такого минерала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аргунов К.П.* Алмазы Якутии. —Новосибирск: ГЕО, 2005.
2. *Бартошинский З.В., Квасница В.Н.* Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. —Киев: Наукова Думка, 1991.
3. *Бескрованов В.В.* Онтогенез алмаза. —Новосибирск: Наука, 2000.
4. *Бобривич А.П., Бондаренко М.Н., Гневушев М.А.* Алмазные месторождения Якутии. —М.: Недра, 1959.
5. *Богатиков О.А., Кононова В.А., Голубев Ю.Ю.* Петрохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // *Геохимия*. 2004. № 9. С. 915—939.
6. *Буланова Г.П., Барашков Ю.П., Тальникова С.Б., Смелова Г.П.* Природный алмаз — генетические аспекты. —Новосибирск: Наука, 1993.
7. *Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г.* Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. —М.: Наука, 1997.
8. *Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Марфунин А.С.* и др. Включения в алмазе и алмазоносные породы. —М.: Изд-во Московского гос. ун-та, 1991.
9. *Занкович Н.С.* Магматические фазы внедрения кимберлитов как отражение процессов формирования сложно построенных трубок Якутии // *Геология алмаза — настоящее и будущее*. —Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2005. С. 467—481.
10. *Зинчук Н.Е., Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. —М.: Недра, 2003.
11. *Илутин И.П., Каминский Ф.В., Францессон Е.В.* Геохимия кимберлитов. —М.: Недра, 1978.
12. *Латин А.В., Толстов А.В., Лисицын Д.В.* Кимберлиты и конвергентные породы. —Мирный, 2004.
13. *Персиков Э.С.* Вязкость магматических расплавов. —М.: Наука, 1984.
14. *Соболев Н.В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. —Новосибирск: Наука, 1976.
15. *Томишин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П.* и др. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39. № 12. С. 1693—1703.
16. *Фролов А.А., Латин А.В., Толстов А.В.* и др. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз). —М.: НИИ-Природа, 2005.
17. *Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.* Коренные месторождения кимберлитов Мира. —М.: Недра, 1998.
18. *Чайковский И.И.* Петрология и минералогия интрузивных алмазоносных пирокластов Вишерского Урала. —Пермь: Изд-во Пермского гос. ун-та, 2001.
19. *Шкодзинский В.С., Зайцев А.И.* Происхождение алмаза в кимберлитах // *Отечественная геология*. 2005. № 5. С. 50—53.
20. *Hamilton M.A., Sobolev N.V., Stern A.R., Pearson D.G.* SHRIMP U-Pb dating of a perovskite inclusions in diamond: evidence for a syneruption age for diamond formation, Sytykansкая pipe, Yakutia region, Siberia // 8th Kimberlite conference. Long Abstract. —Victoria, Canada, 2003.
21. *Meyer H.O.A.* Inclusions in diamonds / Nixon, P.H. (Ed). *Mantle Xenoliths*. —Wiley, England. 1987. P. 501—523.
22. *Navon O., Izraeli E.S., Klein-BenDavid O.* Fluid inclusions in diamonds — the carbonatitic connection // 8th Kimberlite Conference. Long Abstract. —Victoria, Canada, 2003.
23. *Nowicki T., Crawford B., Dyck D., Carlson J., McElory R., Oshust P., Helmstaedt H.* The geology of kimberlite pipes of the Ekaty property, Northwest Territories, Canada // 8th International Kimberlite Conference. Selected Papers. Vol. 1. 2004. P. 1—2.
24. *Shimizu N., Sobolev N.V.* Young peridotitic diamonds from the Mir kimberlite pipe // *Nature*. 1995. Vol. 375. P. 394—397.
25. *Sunagava I.* Materials science of the Earth's interior. —Tokio, 1984.