

## НОРМАТИВНЫЙ КВАРЦ КАК КРИТЕРИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОСТМАГМАТИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ БОТУОБИНСКАЯ (Якутия)

**В.Б. Василенко, А.В. Толстов\*, В.А. Минин, Л.Г. Кузнецова, Н.В. Сурков**

*Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия  
\* АК «АЛРОСА», Ботубинская геолого-разведочная экспедиция, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 44б, Россия*

Проведена оценка интенсивности проявления постмагматических процессов в кимберлитах трубки Ботубинская на основе вычисления содержаний нормативного вторичного кварца (Q). Для расчета количества Q по силикатным анализам кимберлитов предложено несколько простых алгоритмов. По содержаниям Q выделено 10 групп измененных кимберлитов. Групповые содержания MgO, ряда редких элементов и легких редкоземельных элементов, содержания хрома и кальция в малиновых гранатах, алмазоносность и средний вес зерен алмазов убывают в связи с возрастанием количества нормативного вторичного кварца. Показано, что наиболее эффективным показателем постмагматического изменения кимберлитов является отрицательная корреляция SiO<sub>2</sub> и MgO. По мере возрастания степени вторичного изменения кимберлиты превращаются в ассоциацию кварца и глинистых минералов, обогащенных рядом редких элементов и почти полностью лишенных элементов редких земель и алмазов.

*Нормативный кварц, постмагматические процессы, кимберлиты, Якутия.*

## NORMATIVE QUARTZ AS AN INDICATOR OF THE MASS TRANSFER INTENSITY DURING THE POSTMAGMATIC ALTERATION OF THE BOTUOBINSKAYA PIPE KIMBERLITES (Yakutia)

**V.B. Vasilenko, A.V. Tolstov, V.A. Minin, L.G. Kuznetsova, and N.V. Surkov**

The intensity of postmagmatic processes in the Botuobinskaya pipe kimberlites was estimated from the calculated content of normative secondary quartz (Q). Several simple algorithms are proposed to calculate the Q content from chemical analyses of kimberlites. Ten groups of altered kimberlites have been recognized from the Q contents. The contents of MgO, some trace elements, and LREE in the groups, the contents of Cr and Ca of crimson garnets, the diamond contents of kimberlites, and the average weight of diamonds decrease as the Q content increases. It is shown that the negative SiO<sub>2</sub>–MgO correlation is the most effective indicator of the postmagmatic alteration of kimberlites. As the degree of their secondary alteration increases, the kimberlites transform into an assemblage of quartz and clay minerals enriched in some trace elements and almost completely lacking REE and diamonds.

*Normative quartz, postmagmatic processes, kimberlites, Yakutia*

### ВВЕДЕНИЕ

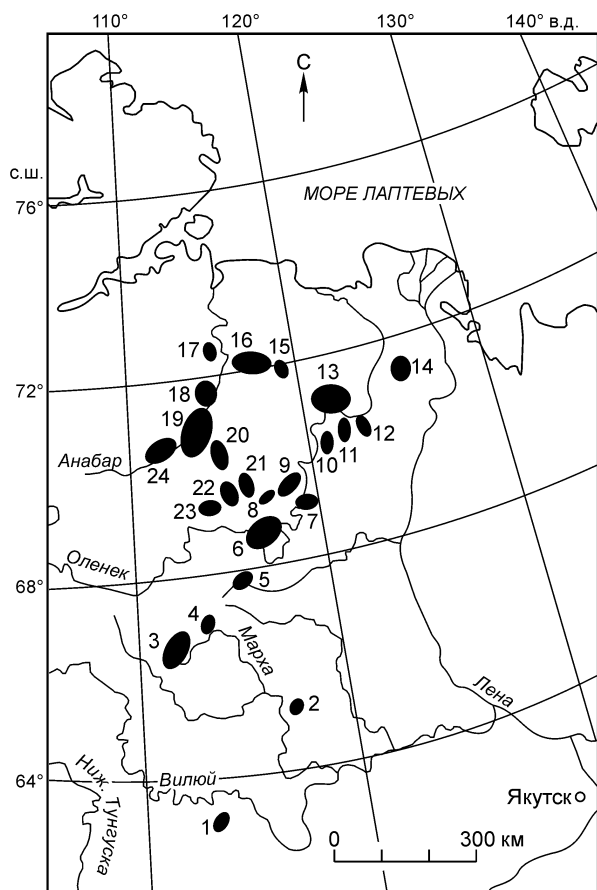
Кимберлиты чрезвычайно интересны как производные наиболее глубоких магматических расплавов. Они содержат фрагменты пород и минералов верхней мантии и высокобарические акцессории, среди которых важнейшее значение имеет алмаз.

Наряду с традиционно практикующимся изучением ксеногенного материала кимберлитов в последнее время все большее внимание уделяется петрохимии самих кимберлитов и особенно вариациям их составов в отношении содержаний породообразующих оксидов, редких элементов и алмазоносности. Однако эти исследования затруднены тем, что кимберлиты, как и другие магматические породы щелочно-ультраосновного состава, подвержены значительным постмагматическим изменениям. Особенности массопереноса при этих изменениях кимберлитов и эффективные критерии интенсивности их проявлений изучены недостаточно.

В настоящей работе предпринято изучение количественных характеристик изменений концентраций химических элементов при постмагматических изменениях кимберлитов с одновременной расчетной оценкой эквивалентного нерастворимого остатка — минералов группы кварца. Количество такого остатка в качестве «нормативного вторичного кварца» может быть вычислено по предложенным простым алгоритмам для любого силикатного анализа кимберлита и использовано в качестве показателя интенсивности постмагматических процессов.

### СВОБОДНАЯ КРЕМНЕКИСЛОТА В КИМБЕРЛИТАХ

**Распределение SiO<sub>2</sub> и MgO.** Главными породообразующими минералами кимберлитов являются оливин, кальцит и флогопит [Шамшина, 1979; Классификация..., 1981; Милашев, 1990]. Другие минералы



**Рис. 1. Расположение кимберлитовых полей Якутской кимберлитовой провинции.**

1—24 — поля провинции: 1 — Мирнинское, 2 — Накынское, 3 — Алаakit-Мархинское, 4 — Далдынское, 5 — Верхнемунское, 6 — Чомурдахское, 7 — Огонньер-Юряхское, 8 — Западно-Укуитское, 9 — Восточно-Укуитское, 10 — Мерчимденское, 11 — Молодинское, 12 — Толуопское, 13 — Куойкское, 14 — Хорбусуонское, 15 — Томторское, 16 — Эбеляхское, 17 — Ыаргинское, 18 — Старореченское, 19 — Ары-Мастахское, 20 — Дюкенское, 21 — Лучаканское, 22 — Биригиндинское, 23 — Куранахское, 24 — Анабарское.

обычно составляют менее 1 % объема породы. Распределения оливина и флогопита определяют особенности распределений  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$ , связь между которыми имеет отчетливо положительный характер. В этом можно убедиться на примере эмпирической регрессии средних содержаний  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$  в 90 кимберлитовых телах Мирнинского, Накынского, Алаakit-Мархинского, Далдынского и Верхнемунского полей Якутской кимберлитовой провинции (рис. 1), при расчете которых использованы 7500 силикатных анализов отдельных образцов кимберлитов. Корреляционная зависимость между средними содержаниями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  (рис. 2) является достаточно тесной ( $r = 82$ ). Уравнение линейной регрессии для 90 пар средних значений  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  имеет вид:  $\text{SiO}_2 = 12.39 + 0.57 \text{ MgO}$ . Ошибка индивидуального предсказания  $\text{SiO}_2$  —  $S_{\text{SiO}_2} = 9.2 \%$ .

О тесной связи  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$  необходимо помнить при исследовании высококремнистых составов кимберлитов: высокие содержания кремния должны сопрягаться с высокими содержаниями магния.

**Проблемы идентификации и контаминации кимберлитов.** Приводимые иногда в литературе высококремнистые составы кимберлитов с содержаниями  $\text{SiO}_2$ , значительно превышающими количество кремнекислоты, связанной в оливине и флогопите (табл. 1), интерпретируются как контаминированные породы.

В среднем содержания  $\text{SiO}_2$  в кимберлитах ниже нижнего порога для магматических и вулканических пород [Классификация..., 1981]. По нашим данным, включающим 7527 анализов, в среднем кимберлиты Якутской провинции содержат:  $\text{SiO}_2$  — 26.73;  $\text{TiO}_2$  — 1.34;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 2.70;  $\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 6.73;  $\text{MgO}$  — 25.42;  $\text{CaO}$  — 14.04;  $\text{Na}_2\text{O}$  — 0.13;  $\text{K}_2\text{O}$  — 0.58;  $\text{P}_2\text{O}_5$  — 0.50; п.п.п. — 21.84 мас. %.

Пониженные относительно других вулканических пород содержания  $\text{SiO}_2$  в кимберлитах, и наличие в них магматического кальцита [Smith et al., 1979; Классификация..., 1981; Литвин, 1984; Василенко и др., 1997, Vasilenko et al., 2002] имеют важное петрологическое значение — они снижают вязкость кимберлитов на ликвидусе до уровней ниже вязкости расплавов всех других магматических и вулканических пород [Василенко и др., 1997]. В результате этого протокимберлитовые расплавы могли подниматься с относительно более высокими скоростями, чем расплавы ультраосновных и основных пород других видов, что обеспечивало лучшую сохранность алмазов при транспортировке в более высокие горизонты земной коры. Поэтому появление в научных журналах сообщений о составах кимберлитов с высокими содержаниями  $\text{SiO}_2$  вызывает особый интерес. Однако нередко высокие содержания  $\text{SiO}_2$  приписываются кимберлитам ошибочно, когда за кимберлиты принимаются пикритоиды других видов или ультраоснов-

**Рис. 2. Распределение фигуративных точек средних содержаний  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  в 90 кимберлитовых телах Мирнинского, Накынского, Алаakit-Мархинского, Далдынского и Верхнемунского полей Якутской кимберлитовой провинции.**

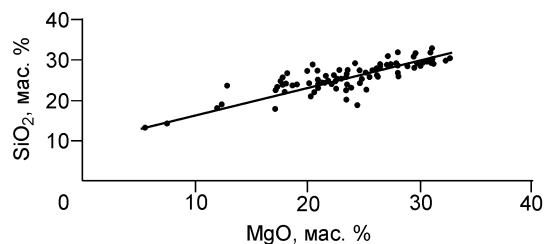


Таблица 1. Примеры составов кимберлитов других провинций с повышенным содержанием SiO<sub>2</sub> (мас.%)

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Q	Литература
1	43.77	1.79	2.40	10.59	23.35	6.67	0.01	0.25	0.10	11.14	24.16	[Greenwood et al., 1998]
2	44.57	2.34	3.73	8.46	23.96	5.16	0.12	0.28	0.31	10.08	24.18	
3	36.3	0.71	3.41	7.05	27.72	7.99	0.08	0.55	0.53	14.3	12.31	[Graham et al., 1998]
4	35.99	1.31	2.74	9.47	28.39	7.27	0.14	0.34	0.37	10.5	12.04	[O'Brien, Tyne, 1998]
5	39.43	1.95	3.62	9.32	26.95	6.19	1.05	2.44	0.34	9.36	10.77	
6	34.95	1.07	3.51	7.72	23.4	10.54	0.22	1.65	0.63	15.39	11.38	[Seggie et al., 1998]
7	35.84	1.08	3.74	7.92	24.84	8.79	0.63	1.41	0.66	14.2	11.77	
8	42.4	0.31	5.23	6.65	26.9	2.9	0.25	0.81	0.21	14.1	18.34	[Пелл, 1997]
9	42.5	0.89	5.56	7.08	22.2	6.18	0.29	2.74	0.33	10.7	19.35	
10	37.66	1.17	5.41	9.55	23.61	7.28	0.18	0.49	0.31	13.39	17.16	[Nixon, 1976]
11	38.67	1.06	7.19	9.64	23.38	5.91	0.13	0.25	0.32	12.76	19.03	[Nixon, Boyd, 1973]
12	32.41	2.58	277	11.11	24.54	7.24	0	1.18	0.6	16.34	9.23	[Skinner et al., 2004]
13	34.91	2.56	4.25	10.14	22.67	7.87	0.01	1.84	0.4	13.77	11.40	
14	42.04	1.71	5.39	928	23.07	8.75	0.31	0.52	0.51	7.32	21.90	[Chalapathi et al., 2004]
15	42.2	1.55	5.41	9.07	24.16	8.66	0.34	0.63	0.38	7.45	20.87	
16	36.06	0.22	1.41	6.26	27.22	10.1	0.14	0.32	0.45	17.52	13.12	[Василенко и др., 1997]
17	34.06	0.34	5.23	3.61	22.8	10.35	0.38	1.36	0.32	18.21	16.18	

ные породы близких к кимберлитам составов [Классификация..., 1981]. Таким образом, по литературным данным, повышенные содержания SiO<sub>2</sub> могут иметь место в контаминированных кимберлитах и при идентификации в качестве кимберлитов пород других видов.

Для идентификации кимберлитов по петрохимическим данным можно пользоваться петрохимическими классификациями магматических и вулканических пород [Классификация..., 1981] и описаниями составов пород алмазных месторождений. При этом весьма эффективными инструментами оказываются алгоритмы распознавания образов [Василенко и др., 2000].

Обычно для оценки степени коровой контаминации многими исследователями используется индекс контаминации (C.I.):

$$C.I. = (SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O)/(MgO + K_2O) \text{ [Clement, 1982].}$$

Кимберлиты с C.I. < 1.4 рассматриваются как неконтаминированные. К числу недостатков индекса контаминации, дающего соотношение глинистых и железомagneзиальных минералов, относится необходимость доказательства ксеногенного происхождения глинистых минералов. Кроме того, индекс контаминации не применим для кимберлитов, залегающих в известняках и эвапоритах, что наиболее характерно для кимберлитов Якутии.

В нашей практике изучения кимберлитов проблема контаминации и ксеногибридизма снималась использованием специальной методики подготовки аналитических навесок. Для этого фрагмент керна скважины или штуфный образец породы при подготовке аналитической навески предварительно распиливался на ряд пластин с таким расчетом, чтобы количество исследуемого материала составляло примерно 600 г. Исследуемые пластины кимберлита помещались под бинокулярный микроскоп и каждый ксенолит или скопление ксенокристов обводились маркером и закрашивались (рис. 3, а, б). После дробления ксеногенный материал удалялся. Оставшаяся связующая масса (см. рис. 3, в) и представляет собой собственно кимберлит. Надежность принятого метода подготовки аналитических навесок неоднократно контролировалась сериями параллельных навесок. Во всех случаях была получена аналитически обоснованная надежность результатов.

Однако всегда есть вероятность попадания в аналитическую навеску микроксенолитов или контаминированных кимберлитов, которые могут придать новые черты химическому составу кимберлитов. Устранение последствий таких явлений реализуется вовлечением в исследовательский процесс значительных количеств образцов кимберлита, обеспечивающих действие закона больших чисел. Этот закон — одно из основных положений теории вероятности, в силу которого совокупное действие большого числа случайных факторов приводит к результату, почти не зависящему от случая [Крамер, 1975].

Однако имеется немало примеров отклонения от линии регрессии содержаний SiO<sub>2</sub> и MgO и при отсутствии проблем, связанных с идентификацией и контаминацией кимберлитов. Например, в изучаемой тр. Ботубинская (рис. 4) выделяются составы с аномально высокими и аномально низкими содержаниями SiO<sub>2</sub> относительно линии регрессии, аналогичной линии, показанной на рис. 2.

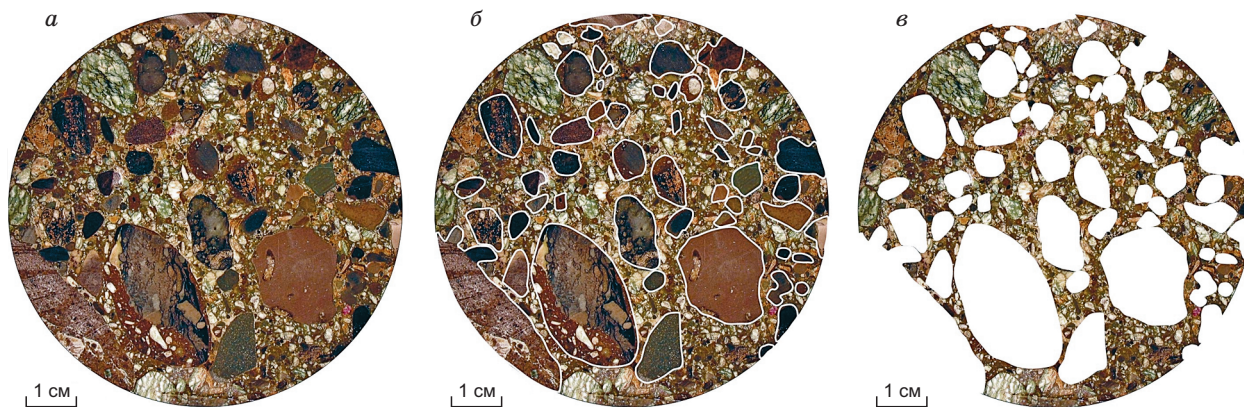


Рис. 3. Этапы подготовки аналитического образца.

*а* — исследуемый образец, *б* — оконтуривание ксенолитов, *в* — цементирующий кимберлит.

Как оказалось, наибольший вклад в изменение первичного состава кимберлитов с образованием избыточного количества  $\text{SiO}_2$  вносят постмагматические изменения пород.

**Постмагматические изменения.** Постмагматические изменения кимберлитов Якутии наиболее подробно описаны в работах Э.А. Шамшиной [1979] и Н.Н. Зинчука [2000]. При раскristализации кимберлитовых расплавов освобождается значительное количество воды, которая вызывает серпентинизацию вкрапленников оливина и минералов основной массы кимберлита. Процесс протекает при температурах 500—200 °С. Серпентинизация оливина может происходить изохимически (с образованием брусита) и аллохимически (при инертном поведении кремнекислоты и подвижном — магнезии). Общепринятой точкой зрения является представление о том, что в кимберлитах Якутии процесс серпентинизации проходит аллохимически с выносом  $\text{MgO}$  и накоплением  $\text{SiO}_2$ .

На последующих стадиях автотметасоматического изменения кимберлита серпентин замещается минералами группы монтмориллонита [Шамшина, 1979], среди которых ранее других образуется триоктаэдрический монтмориллонит — сапонит. Отношение  $\text{MgO}$  к  $\text{SiO}_2$  в сапоните составляет 0.5. Падение отношения  $\text{MgO}$  к  $\text{SiO}_2$  ниже 0.5 свидетельствует о полном разложении серпентина и образовании на его месте нонтронита. Дальнейшее снижение отношения  $\text{MgO}$  к  $\text{SiO}_2$  (до 0.2 и ниже) создает предпосылку для значительного накопления глинозема в измененных породах.

Наряду с изменениями оливина происходит изменение флогопита, сначала путем замещения вермикулитом, затем — монтмориллонитом.

Весь процесс автотметасоматического изменения кимберлитов (за исключением редких участков с бруситом) происходит на фоне интенсивного выноса  $\text{MgO}$ , затем  $\text{K}_2\text{O}$  и других оксидов, и накопления  $\text{SiO}_2$ .

Сравнение составов неизмененных и измененных кимберлитов трубок Нюрбинская (Накынское поле), Айхал, Сытыканская (Алакит-Мархинское поле), Мир (Мирнинское поле), Удачная-восточная, Удачная-западная (Далдынское поле) показало, что вторичные процессы разрушают корреляционные связи между оксидами, характерные для неизмененных кимберлитов, и создают новые (рис. 5, б). Эти данные свидетельствуют о том, что процессы постмагматического изменения кимберлитов действительно проходят при отчетливом антагонизме  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  и полностью перестраивают направленность петрохимических связей неизмененных кимберлитов.

**Нормативный вторичный кварц (Q).** В измененных кимберлитах встречаются как явно кристаллические, так и скрытокристаллические разновидности вторичного кварца. Прямое определение их количества связано с серьезными трудностями. Поэтому избыточные количества  $\text{SiO}_2$  в измененных кимберлитах могут быть вычислены как нормативный вторичный кварц (Q). Расчет Q произведен на основе средних составов главных породообразующих минералов кимберлита, а также минералов-примесей — диопсида и доломита (табл. 2).

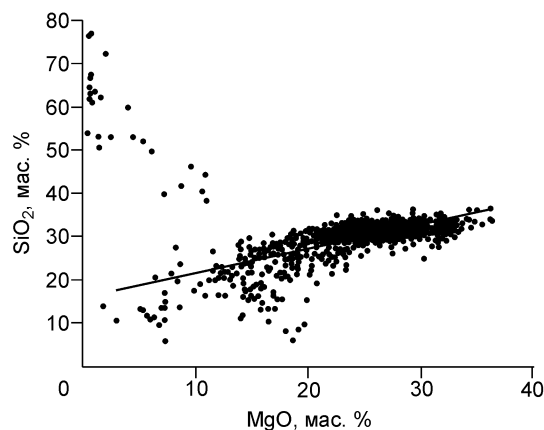


Рис. 4. Распределение фигуративных точек анализов кимберлитов тр. Ботуобинская.



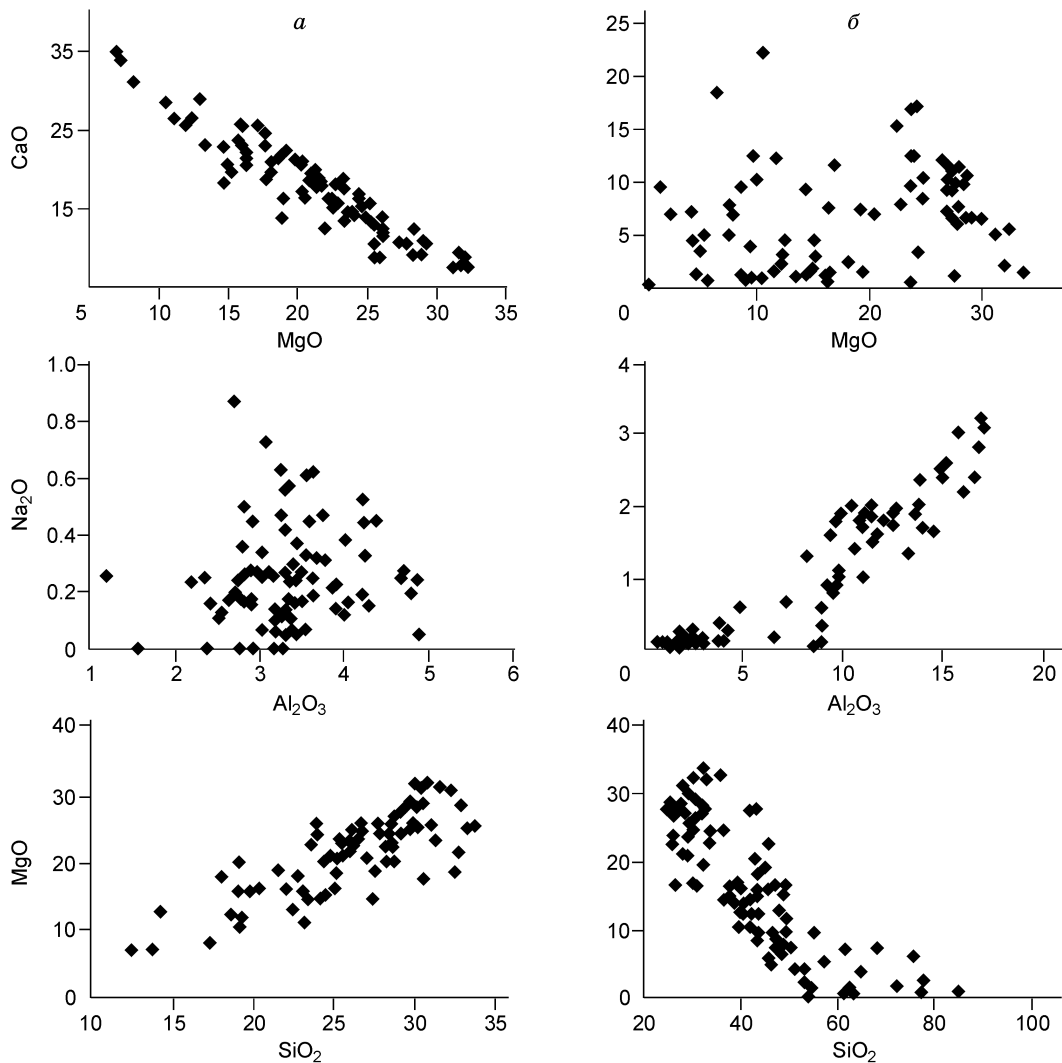


Рис. 5. Корреляционные связи между породообразующими оксидами (мас.%) в неизмененных (а) и измененных (б) кимберлитах.

В процессе вычисления Q использованы следующие отношения между оксидами (мас.%) в минералах: в кальците  $\text{CaO}/\text{CO}_2 = 1.27$ ; в диопсиде  $\text{MgO}/\text{CaO} = 0.86$ ,  $\text{SiO}_2/\text{CaO} = 2.69$ ; во флогопите  $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O} = 3.72$ ,  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O} = 5.81$ ; в оливине  $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 0.81$ ; в доломите  $\text{MgO}/\text{CO}_2 = 0.45$ .

Вычисления произведены в зависимости от характера исходных данных по предлагаемым алгоритмам:

А)  $\text{CaO} > \text{CO}_2$ , без учета доломита. В этом случае:

$$\text{CaO}_{\text{кльц}} = \text{CO}_2_{\text{кльб}} \cdot 1.27;$$

$$\text{CaO}_{\text{диопс}} = \text{CaO}_{\text{кльб}} - \text{CaO}_{\text{кльц}};$$

$$\text{MgO}_{\text{диопс}} = \text{CaO}_{\text{диопс}} \cdot 0.86;$$

$$\text{SiO}_2_{\text{диопс}} = \text{CaO}_{\text{диопс}} \cdot 2.69;$$

$$\text{MgO}_{\text{флог}} = \text{K}_2\text{O}_{\text{кльб}} \cdot 3.72;$$

$$\text{SiO}_2_{\text{флог}} = \text{K}_2\text{O}_{\text{кльб}} \cdot 5.81;$$

$$\text{MgO}_{\text{ол}} = \text{MgO}_{\text{кльб}} - \text{MgO}_{\text{диопс}} - \text{MgO}_{\text{флог}};$$

$$\text{SiO}_2_{\text{ол}} = \text{MgO}_{\text{ол}} \cdot 0.81;$$

$$Q = \text{SiO}_2_{\text{кльб}} - \text{SiO}_2_{\text{ол}} - \text{SiO}_2_{\text{диопс}} - \text{SiO}_2_{\text{флог}};$$

По варианту А:  $Q = \text{SiO}_2 - 0.81\text{MgO} - 2.0\text{CaO} + 2.54\text{CO}_2 - 2.8\text{K}_2\text{O}$ .

В)  $\text{CO}_2 > \text{CaO}$  и  $\text{CO}_2 = \text{CaO}$ , без учета диопсида. В этом случае:

$$\text{CO}_2_{\text{кльц}} = \text{CaO}_{\text{кльб}} \cdot 1.27;$$

$$\text{MgO}_{\text{дол}} = (\text{CO}_2_{\text{кльб}} - \text{CO}_2_{\text{кльц}}) \cdot 0.45;$$

$$\begin{aligned} \text{MgO}_{\text{флог}} &= \text{K}_2\text{O}_{\text{кмб}} \cdot 3.72; \\ \text{MgO}_{\text{ол}} &= \text{MgO}_{\text{кмб}} - \text{MgO}_{\text{дол}} - \text{MgO}_{\text{флог}}; \\ \text{SiO}_{2\text{флог}} &= \text{K}_2\text{O}_{\text{кмб}} \cdot 5.81; \\ \text{SiO}_{2\text{ол}} &= \text{MgO}_{\text{ол}} \cdot 0.81; \end{aligned}$$

$$Q = \text{SiO}_{2\text{кмб}} - \text{SiO}_{2\text{ол}} - \text{SiO}_{2\text{флог}}$$

По варианту В:  $Q = \text{SiO}_2 - 0.81\text{MgO} - 0.28\text{CaO} + 0.36\text{CO}_2 - 2.8\text{K}_2\text{O}$ .

С) Упрощенный алгоритм без учета диопсида и доломита:

$$\begin{aligned} \text{MgO}_{\text{флог}} &= \text{K}_2\text{O}_{\text{кмб}} \cdot 3.72; \\ \text{SiO}_{2\text{флог}} &= \text{K}_2\text{O}_{\text{кмб}} \cdot 5.81; \\ \text{MgO}_{\text{ол}} &= \text{MgO}_{\text{кмб}} - \text{MgO}_{\text{флог}}; \\ \text{SiO}_{2\text{ол}} &= \text{MgO}_{\text{ол}} \cdot 0.81; \end{aligned}$$

$$Q = \text{SiO}_{2\text{кмб}} - \text{SiO}_{2\text{флог}} - \text{SiO}_{2\text{ол}}$$

По варианту С:  $Q = \text{SiO}_2 - 0.81\text{MgO} - 2.8\text{K}_2\text{O}$ .

Использование алгоритмов А и В оптимально при наличии определений  $\text{CO}_2$ . Для наиболее широко используемых рентгенофлуоресцентных анализов (без определения летучих компонентов) рекомендуется использование алгоритма С.

В качестве примера расчета нормативного вторичного кварца взяты образцы из табл. 1, для которых оптимальным является алгоритм С. Результаты расчета показали, что для всех образцов в табл. 1 содержания Q весьма значительны.

Представление об эффективности использования Q в качестве показателя интенсивности процесса постмагматического изменения кимберлитов можно получить, сопоставляя содержания Q с содержаниями в тех же образцах породообразующих оксидов, редких элементов и индикаторных минералов.

Ниже приведены результаты изучения количественных характеристик массопереноса при постмагматических изменениях кимберлитов на основе содержаний Q в одной из алмазоносных трубок Якутии — тр. Ботуобинская.

### ТРУБКА БОТУОБИНСКАЯ

**Общие сведения.** Трубка открыта в марте 1994 г. Она расположена в среднем течении р. Марха в пределах Накынского кимберлитового поля. Поле приурочено к Вилуйско-Мархинской кимберлитоконтролирующей зоне (см. рис. 1). Трубку вмещают карбонатные породы раннего ордовика. Радиологические датировки (332—364 млн лет) позволяют предполагать, что кимберлиты образовались на рубеже позднего девона—раннего карбона [Agashev et al., 1998]. По данным А.И. Зайцева [2001], радиологические датировки ограничивают время проявления кимберлитов в интервале 450—380 млн лет.

Ботуобинская трубка в плане под юрскими отложениями имеет форму неправильного овала, в пределах которого выделяется дайкообразное тело северо-восточного простирания, выполненное порфировыми кимберлитами. Диатремовая часть и кратерная воронка сложены кимберлитовой брекчией [Занкович, Зинчук, 2001].

**Фактический материал и методы изучения.** Для определения влияния вторичных процессов на петрографические, минералогические и петрохимические характеристики кимберлитов из тр. Ботуобинская изучены образцы зерна диаметром 90 и длиной 150—200 мм. Они отобраны из 44 скважин, расположенных по 11 разведочным линиям. Линии перекрывают все тело трубки. Всего изучено 1003 таких образца (см. [Василенко и др., 1997], Приложение 1). В том числе для 484 образцов имеются определения

Таблица 2. Средние составы минералов в кимберлитах

Минерал	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
Оливин	40.55	0.03	0.39	1.20	7.53	49.57	0.11	0.04	0.02	—
Флогопит	40.74	1.59	10.96	3.05	3.45	26.05	0.25	0.20	7.01	—
Диопсид	53.67	0.34	2.78	1.64	2.08	17.18	19.89	1.27	0.16	0.16
Кальцит	—	—	—	—	—	—	56.00	—	—	44.00
Доломит	—	—	—	—	—	21.70	30.40	—	—	47.90

Примечание. Составы (мас.%) оливина и флогопита даны по В.А. Милашеву [1990], диопсида — по Н.Л. Добрецову с соавторами [1971], кальцита и доломита — по А.Г. Бетехтину [1956].

Таблица 3. Среднеквадратичные отклонения (s) определений породообразующих оксидов и Q

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Q
1.25	0.08	0.47	0.38	0.69	0.92	0.07	0.03	0.78	1.24

весовых содержаний ксенолитов и цементирующей массы кимберлитов; для 18 образцов определены на микрозонде составы 226 зерен гранатов; в 496 примерно десятиметровых интервалах керна определена алмазоносность кимберлитов. В 1003 изученных образцах рентгенофлюоресцентным методом определены содержания 10 породообразующих оксидов на рентгеновском анализаторе VRA-20R производства фирмы К. Цейсс (Йена). Пределы обнаружений содержаний  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  находятся на уровнях 0.2—0.005 %, а для  $\text{MgO}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  они составляют 0.1 и 0.2 % соответственно. Ошибки воспроизводимости определения оксидов и расчета Q (по алгоритму С)

Таблица 4. Содержания нормативного вторичного кварца (Q) в кимберлитах тр. Ботубинская

Группа	Число определений	Среднее содержание Q в группе, %	Стандартное отклонение
1	7	-7.62	1.90
2	23	-2.19	1.41
3	85	2.45	0.92
4	250	5.09	0.66
5	443	7.34	0.82
6	159	10.05	0.78
7	11	13.77	1.02
8	9	30.05	5.89
9	14	54.64	7.74
10	2	73.25	0.30

рассчитаны по 49 параллельным пробам кимберлитов [Василенко и др., 2006]. Значения стандартных отклонений воспроизводимости (с учетом ошибки опробования) показаны в табл. 3.

Содержания редких элементов в 478 образцах определены рентгенофлюоресцентным методом на рентгенофлюоресцентном анализаторе S4 Explorer «Bruker», Германия. Определения содержаний элементов редких земель в 80 образцах выполнены нейтронно-активационным методом. Среднеквадратичные ошибки воспроизводимости этих методов проверены на том же материале. Их значения не превышают допустимых среднеквадратичных отклонений согласно [Методические..., 1979].

**Нормативный вторичный кварц (Q).** Количество Q в образцах кимберлитов рассчитывалось по алгоритму С. Значения всех содержаний Q на основании особенностей эмпирического распределения частот их содержаний сгруппированы в 10 групп с таким расчетом, чтобы минимальное значение классового интервала превышало ошибку вычисления Q (см. табл. 3) не менее чем в 2 раза [Василенко и др., 1982] (табл. 4).

Средние составы этих групп, ранжированные по возрастанию среднего содержания Q, иллюстрируют последовательное изменение составов при нарастании степени вторичного изменения кимберлитов. Рассмотрим эти группы.

Группы 1 и 2 представляют собой породы, доломитизированные в процессе выветривания кимберлитов. Об этом свидетельствуют их существенно доломитовый состав и наличие минералов зоны гипергенеза (табл. 5).

Группы с содержанием Q, равным 2.45—10.05 % (гр. 3—6), отнесены к кварцсодержащим незначительно измененным кимберлитам (см. табл. 4). Породы групп 7—10 — к окварцованным кимберлитам (рис. 6), для которых характерно значительное изменение первичного состава. Особенности составов кварцсодержащих и окварцованных кимберлитов будут охарактеризованы ниже.

Группы кимберлитов с разными содержаниями Q были использованы для иллюстрации изменения вещественного состава пород в результате воздействия постмагматических процессов. Количество Q здесь выступает в качестве индикатора интенсивности проявления постмагматических процессов.

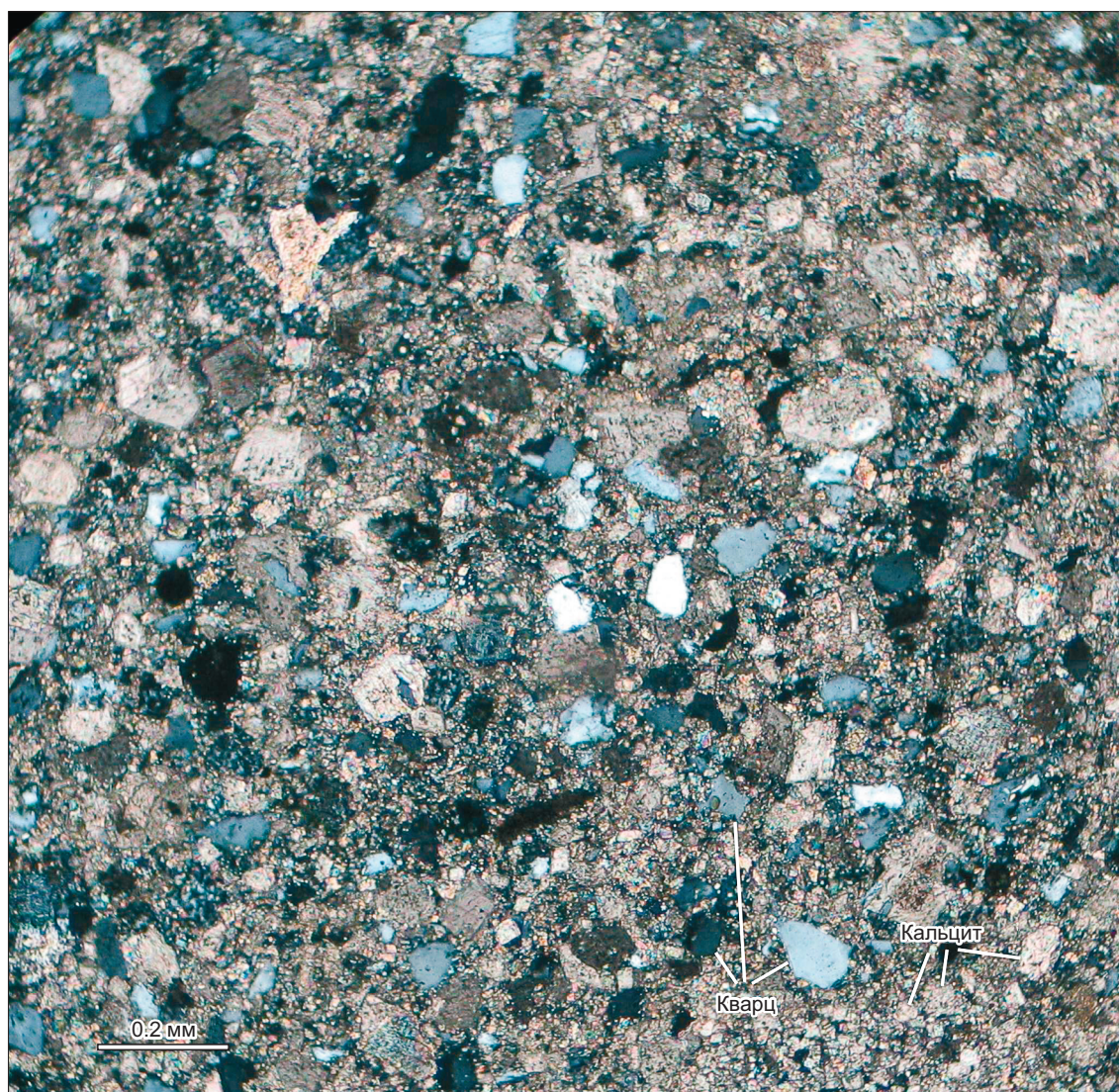
## ПЕТРОГРАФИЯ

По мнению большинства петрографов, одними из главных компонентов, определяющих текстурно-структурный вид кимберлита, являются ксенолиты и порфиновые вкрапленники.

Таблица 5. Минеральный состав некоторых образцов доломитизированных кимберлитов по данным рентгенофазового анализа

№ п/п	Минеральный состав	Примечание
1	Основная фаза — доломит; примесь флогопита, кальцита, следы апатита и хлорита	—
2	Основная фаза — доломит; следы кварца, кпш	Степень кристалличности доломита и кальцита ниже, чем в № 3 и 5
3	Основная фаза — доломит; примесь флогопита, следы кпш, пиропса, диопсида, кальцита, кварца, апатита	Здесь возможны две слюды: триоктаэдрическая и диоктаэдрическая
4	Основная фаза — доломит; примесь флогопита, кальцита, следы апатита, граната, гипса	Доломит несколько менее окристаллизован, чем в других образцах
5	Основная фаза — доломит; примесь флогопита, кальцита, пиропса, следы кпш, кварца, диопсида, апатита, хлорита	Здесь возможны две слюды: триоктаэдрическая и диоктаэдрическая
6	Основная фаза — доломит; примесь кальцита, флогопита, гипса, кварца	—





**Рис. 6. Микрофотография (в проходящем свете) гидротермально измененной кимберлитовой брекчии.**

Основная масса замещена гранобластовым агрегатом кальцита и кварца.

Выделение текстурно-структурных видов кимберлитов тр. Ботубинская проведено на количественной основе. Для этого дробился поперечный спил керна весом около 600 г. После отделения ксеногенного материала определялось весовое соотношение его и вмещающей массы кимберлита. Проведенное изучение 484 образцов показало, что ксенолиты силикатных пород были встречены в 53 образцах, только 6 из которых можно отнести к разряду мантийных, а остальные — к гранат-пироксеновым гнейсам. Во всех остальных 431 изученном образце ксенолиты представлены карбонатным материалом вмещающих пород. По соотношению ксеногенного и кимберлитового материала можно выделить породы, лишенные ксенолитов (<10%), — массивные порфировые (автолитовые и безавтолитовые) кимберлиты, породы с содержанием ксеногенного материала от 10 до 50% — брекчиевидные (автолитовые и безавтолитовые) кимберлиты, и породы, количество ксеногенного материала которых превышает 53%, — кимберлитовые брекчии (автолитовые и безавтолитовые).

Распределение 484 образцов разных текстурных типов кимберлитов в группах пород с разным содержанием Q показало (табл. 6), что порфировые кимберлиты наименее изменены, в то время как брекчиевидные кимберлиты и кимберлитовые брекчии изменены в наибольшей степени. Это вполне понятно, поскольку проницаемость кимберлитовых брекчий и брекчиевидных кимберлитов значительно выше, чем порфировых кимберлитов, что обеспечивает большую фильтрацию гидротермальных растворов.



Таблица 6. Распределение текстурных типов кимберлитов (%) по группам нормативного вторичного кварца

Текстурный тип	Группа				
	2	3	4	5	6
Порфиновые кимберлиты ( $n = 93$ )	28	50	28	12	8
Брекчиевидные кимберлиты ( $n = 353$ )	72	42	65	80	78
Кимберлитовые брекчии ( $n = 38$ )	—	8	7	8	15

### МИНЕРАЛОГИЯ

**Типоморфизм вторичного кварца.** Вторичный кварц в кимберлитах обычно представлен халцедоном и кварцем [Зинчук, 2000]. Кристаллы кварца в кимберлитах начинают расти на зародышах халцедона и достигают в длину 5 см. Большинство кристаллов кварца окрашено в фиолетовый цвет. Их формирование происходило в диапазоне температур 260—80 °С.

Типоморфной особенностью вторичного кварца кимберлитов является размер его элементарной ячейки. Ранее на основании изучения 651 образца кварцев из гранитоидов разных регионов были определены параметры их элементарной ячейки. Оказалось, что вторичный кварц кимберлитов по значениям параметров элементарной ячейки отличается от кварца гранитоидов, кварца гидротермального генезиса и кварца из метаморфических пород [Василенко, Холодова, 1973; Василенко и др., 1998]. Индикаторным структурным признаком вторичного кварца кимберлитов являются значения  $a > 4.9140 \pm 0.0006 \text{ \AA}$  и  $a/c > 0.90910$ . Образцы вторичного кварца из тр. Ботуобинская [Зинчук, 2000] имеют параметры элементарной ячейки, соответствующие отмеченным индикаторным значениям (обр. 10а:  $a — 4.9154 \pm 0.0005$ ,  $c — 5.4054 \pm 0.0009$ ,  $a/c — 0.90935$ ; обр. 10б:  $a — 4.9140 \pm 0.0005$ ,  $c — 5.4050 \pm 0.0008$ ,  $a/c — 0.90916$ ).

Вторичный кварц кимберлитов имеет также важное практическое значение. Его количество меняет флотационные свойства алмазов и тем самым влияет на степень их извлекаемости при флотационных процессах. Кроме того, вторичный кварц может использоваться в поисковых целях, поскольку он имеет аномально низкую плотность ( $\rho < 2.630 \text{ г/см}^3 \pm 0.005$ ).

**Гранаты.** В исследованных кимберлитах обнаружены малиновые и оранжевые гранаты (см. [Василенко и др., 1997], Приложение 1). Составы малиновых гранатов распределены по группам кимберлитов с разным содержанием Q (табл. 7).

Обращает на себя внимание последовательное уменьшение групповых содержаний хрома в гранатах по мере увеличения степени измененности кимберлитов.

Этот феномен требует дополнительных пояснений. Дело в том, что под воздействием вторичных изменений в условиях земной коры магнезиальные и магнезиально-хромистые разновидности гранатов термодинамически неустойчивы. Изменять свой состав эти гранаты не могут без разрушения минеральной структуры. Они замещаются ассоциациями фаз, устойчивых при низких давлениях. Учитывая различия в термодинамических областях устойчивости для разных по составу твердых растворов гранатов, можно ожидать, что под воздействием вторичных изменений наиболее быстро будут разрушаться более хромистые, магнезиальные кноррингитсодержащие гранаты [Hsu, 1968; Дорошев и др., 1997].

Таблица 7. Средние составы (мас.%) и стандартные отклонения малиновых гранатов из кварцсодержащих кимберлитов

Оксид	3		4		5		6	
	$n = 16$ (из 1 обр.)		62 (из 6 обр.)		36 (из 5 обр.)		15 (из 1 обр.)	
	$x$	$s$	$x$	$s$	$x$	$s$	$x$	$s$
SiO <sub>2</sub>	40.68	1.32	41.20	0.56	41.29	0.60	41.34	0.34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.59	1.01	5.15	3.41	5.02	2.85	3.71	2.04
CaO	6.04	0.69	5.28	1.04	4.87	1.69	4.43	0.34
MgO	18.38	0.87	19.46	0.97	19.75	1.51	20.23	0.26
FeO	8.36	0.62	7.79	0.84	7.93	0.84	8.14	0.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.59	1.34	19.12	0.57	19.22	2.05	20.32	1.49
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.19	0.22	0.13	0.20	0.10	0.21	0.11
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.02
MnO	0.41	0.06	0.38	0.08	0.37	0.06	0.36	0.07

Примечание. Здесь и в табл. 4: 3—6 — группы нормативного вторичного кварца;  $n$  — количество зерен;  $x$  — среднее;  $s$  — стандартное отклонение.

Таблица 8.

## Средние составы (мас.%) и стандартные отклонения оранжевых гранатов из кварцсодержащих кимберлитов

Оксид	3		4		5		6	
	18 (из 4 обр.)		37 (из 5 обр.)		36 (из 7 обр.)		6 (из 1 обр.)	
	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>x</i>	<i>s</i>
SiO <sub>2</sub>	39.55	0.78	39.96	0.58	39.54	0.91	38.92	0.46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.03	0.09	0.08	0.07	0.06	0.04	0.02
CaO	4.60	1.64	4.92	1.22	4.83	1.84	6.36	0.73
MgO	10.61	3.16	11.90	2.19	10.85	3.79	8.11	1.27
FeO	23.12	3.55	20.53	3.86	22.50	4.81	24.50	2.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.57	0.72	21.89	0.31	21.43	0.73	21.45	0.23
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.10	0.14	0.10	0.19	0.15	0.07	0.05
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03
MnO	0.43	0.12	0.36	0.08	0.43	0.12	0.43	0.13

Таблица 9. Изменение относительной алмазонасности и веса кристалла в разной степени измененных кимберлитах по интервалам опробования

Группа кимберлита разной степени изменения	Q по интервалам опробования, %	Алмазонасность, %*	Средний вес кристалла, %**	Количество кристаллов	Общий вес породы, кг	Количество интервалов опробования
<b>Доломитизированный кимберлит</b>						
1	-4.99	3.00	63.7	7	173.1	2
2	-1.38	30.7	91.6	492	1484	16
<b>Кварцсодержащий кимберлит</b>						
3	2.41	100.0	100.0	3288	3038.5	34
4	5.18	94.5	97.9	15 700	20 167.5	176
5	7.58	90.9	96.2	13 848	19 968	170
6	9.98	65.7	94.2	4833	8686.9	82
<b>Окварцованный кимберлит</b>						
7	13.33	61.2	143.0	295	482.7	6
8	21.08	21.2	71.9	110	421.3	5
9	54.9	18.6	67.5	16	193	5

\* Средняя алмазонасность неизмененных кимберлитов (гр. 3) принята за 100 %.

\*\*Средний вес кристалла неизмененных кимберлитов (гр. 3) принят за 100 %.

В обсуждаемом случае постепенное изменение содержания хрома в гранатах по мере увеличения вторичного изменения кимберлитов следует рассматривать как следствие постепенного разрушения структуры граната.

Хлоритизация пиропы в зоне действия гидротерм, связанных с внедрением долеритового силла в кимберлиты, описана на примере тр. № 4 (Краснопресненская) [Шамшина и др., 1988].

Групповые составы оранжевых гранатов остаются практически неизменными во всех группах кварцсодержащих кимберлитов (табл. 8). Этот феномен объясняется тем, что гранаты пироп-альмандинового ряда вполне могут сохраняться в условиях гидротермального изменения и поверхностного выветривания. Существенное влияние на устойчивость к вторичным изменениям, вероятно, оказывает содержание алмандинового компонента. Чем выше его содержание, тем более устойчивым ко вторичным изменениям должен быть гранат [Yoder, 1955].

**Алмазонасность.** Содержание алмазов в кимберлитах тр. Ботуобинская определялось как среднее по 10-метровым колоннам керна. Поскольку для петрохимической характеристики выбирались 1—2-метровые интервалы керна, то в интервал опробования алмазонасности могли попасть несколько петрохимических анализов. В этом случае они усреднялись. Таким образом, вместо 1003 анализов для рассмотрения особенностей изменения алмазонасности использованы 496 средних и единичных силикатных анализов. Границы разных групп Q оказались почти такими же, как и при использовании 1003 силикатных анализов. Средние содержания алмазов в группах пород выражены в виде нормированных средних (А): групповые средние нормировались на среднее содержание алмазов в гр. 3 (рис. 7). Полученные результаты

свидетельствуют о том, что алмазонасность пород падает по мере увеличения в них групповых содержаний Q. Этот эффект сопровождается уменьшением среднего веса одного алмазного зерна по мере увеличения степени измененности кимберлитов как в кварцсодержащих, так и в окварцованных кимберлитах (табл. 9).

Установленные закономерности в изменении алмазонасности и среднего веса одного кристалла алмаза позволяют нам высказать предположение, что в процессе постмагматического гидротермально-метасоматического изменения кимберлитов происходит растворение алмазов. Сделанное предположение мы не можем подтвердить ссылками на результаты физико-химических экспериментов. Однако наблюдения за природными объектами с метаморфогенно-метасоматическим воздействием на кимберлиты показывают возможность растворения алмазов при метасоматозе. Так, например, Э.А. Шамшина с соавторами [Шамшина и др., 1988] при изучении метасоматического воздействия на кимберлиты тр. № 4 (Краснопресненская) прорывающего их силла долеритов показали, что в эндоконтактах долеритов зона кимберлитов, подверженных метасоматическому изменению, достигает мощности от 20 до 120 м. Этими авторами описаны следы растворения алмазов в метасоматически измененных кимберлитах, причем количество следов растворения алмазов увеличивается по направлению к контакту с долеритами.

### ПЕТРОХИМИЯ

**Породообразующие оксиды.** В доломитизированных кимберлитах (табл. 10, 11) по мере увеличения абсолютного значения Q увеличиваются содержания MgO и CaO. Для кварцсодержащих и окварцованных

Таблица 10. Средние содержания породообразующих оксидов (мас.%) и редких элементов (г/т) в кимберлитах разной степени вторичного изменения

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Доломитизированный кимберлит		Кварцсодержащий кимберлит				Окварцованный кимберлит			
	(7)	(23)	(85)	(250)	(443)	(159)	(11)	(9)	(14)	(2)
SiO <sub>2</sub>	10.42	16.06	26.42	29.71	30.42	29.95	30.46	46.23	59.96	76.13
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.35	0.50	0.45	0.38	0.39	0.31	0.96	0.89	0.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.78	3.89	3.38	3.38	3.62	4.12	3.38	12.48	14.05	13.67
ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	3.99	5.77	5.64	5.26	4.74	3.56	8.35	11.14	1.12
MgO	17.95	16.51	26.66	25.28	24.33	20.07	15.97	7.58	1.59	0.41
CaO	25.40	23.52	12.59	13.89	13.84	16.40	20.54	7.10	1.58	0.35
K <sub>2</sub> O	1.25	1.74	1.08	1.16	1.20	1.30	1.31	3.27	1.46	0.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.32	0.42	0.53	0.49	0.42	0.42	0.34	0.29	0.11	0.04
П.п.п.	38.41	3.89	22.77	19.90	20.59	22.66	23.95	13.29	8.51	6.19
Q	7.62	2.19	2.45	5.09	7.34	10.05	13.77	30.05	54.64	73.25
	(1)	(8)	(26)	(169)	(27)	(27)	(7)	(5)	(11)	(1)
Cr	498.0	494.1	844.2	868.9	665.0	570.8	620.2	395.7	181.3	178.3
Co	73.8	72.2	72.2	61.1	59.9	58.3	58.3	47.2	16.4	0.0
Ba	140.0	227.1	452.5	398.7	372.6	303.4	246.3	393.3	184.0	216.5
Nb	13.5	12.4	23.5	20.8	15.8	13.9	19.6	16.6	14.6	12.8
Ni	398.0	839.1	1075	1376	1276	1234	903.6	755.6	151.5	118.8
Sr	1250	160.9	494.1	700.7	808.4	499.9	374.0	186.6	93.8	53.0
Rb	40.0	39.7	40.8	35.8	35.5	36.3	36.0	77.0	43.0	43.0
Y	12.3	10.4	8.3	8.0	7.3	7.2	7.5	24.2	342	25.4
Zr	72.7	73.8	66.2	62.5	55.7	53.5	55.5	145.3	335.3	388.8
Zn	67.0	27.4	121.8	82.6	56.9	186.8	22.2	162.2	66.0	27.7
V	54.0	58.4	54.6	58.4	56.6	57.7	41.4	124.0	172.5	68.8
Pb	4.0	4.3	3.8	12.2	2.4	3.0	1.9	7.2	30.2	44.4
Th	4.2	3.7	3.9	4.0	4.2	3.9	2.6	5.5	10.1	15.2
U	3.6	2.8	3.0	3.5	3.8	3.1	2.3	2.9	5.6	11.5

Примечание. Здесь и в табл. 11: в скобках — количество анализов; 1—10 — группы кимберлитов.

Таблица 11. Стандартные отклонения содержаний породообразующих оксидов и редких элементов в кимберлитах разной степени вторичного изменения

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Доломитизированный кимберлит		Кварцсодержащий кимберлит				Окварцованный кимберлит			
	(7)	(23)	(85)	(250)	(443)	(159)	(11)	(9)	(14)	(2)
SiO <sub>2</sub>	2.76	4.53	5.27	4.60	3.14	3.47	4.38	6.92	6.71	0.20
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.12	0.16	0.20	0.09	0.07	0.08	0.59	0.28	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.31	1.33	0.77	0.60	0.69	0.96	0.61	3.42	4.47	0.54
ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.69	1.42	3.66	1.45	0.84	0.94	1.30	4.27	4.83	0.08
MgO	1.20	4.92	7.32	5.76	4.28	5.01	7.25	3.10	1.73	0.01
CaO	2.10	7.17	7.17	6.54	4.23	5.11	8.58	5.43	2.19	0.14
K <sub>2</sub> O	0.78	0.82	0.54	0.53	0.49	0.56	0.44	2.02	1.17	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.12	0.16	0.15	0.11	0.10	0.14	0.29	0.06	0.00
П.п.п.	382	4.96	6.53	4.52	3.32	3.40	3.95	5.84	3.25	0.14
Q	1.90	1.41	0.92	0.66	0.82	0.77	1.02	5.89	7.31	0.30
	(1)	(8)	(26)	(169)	(27)	(27)	(7)	(5)	(11)	(1)
Cr	—	248.9	489.9	277.3	195.3	136.4	202.2	347.9	64.2	—
Co	—	59.2	67.9	46.5	29.8	16.3	10.1	30.4	8.9	—
Ba	—	127.4	508.5	207.3	188.3	139.1	2.6	155.0	75.3	—
Nb	—	6.6	13.6	9.2	6.0	6.4	9.1	14.6	5.9	—
Ni	—	374.4	471.5	329.9	224.1	209.2	174.5	811.4	41.2	—
Sr	—	46.9	317.0	533.6	758.8	383.5	93.0	119.0	26.0	—
Rb	—	12.6	9.8	12.0	10.5	6.6	3.0	38.2	15.2	—
Y	—	3.2	4.1	6.7	1.5	1.3	1.4	14.7	10.2	—
Zr	—	26.9	17.4	17.8	12.8	8.6	1.3	48.6	102.4	—
Zn	—	24.4	404.6	315.2	219.0	507.1	2.0	198.1	24.9	—
V	—	14.9	16.0	11.2	8.3	10.9	8.2	44.7	54.9	—
Pb	—	2.2	5.2	12.8	1.7	2.1	0.2	4.1	17.7	—
Th	—	1.5	1.1	0.9	0.8	0.7	0.9	3.0	4.6	—

кимберлитов характерен единый четко проявленный тренд уменьшения содержаний MgO по мере накопления Q. Это главная петрохимическая особенность гидротермально измененных кимберлитов.

Другой важной петрохимической особенностью измененных кимберлитов является накопление в окварцованных группах пород глинозема, железа и калия, что характерно для кор выветривания на кимберлитах.

Обращает на себя внимание постепенное накопление калия по мере увеличения степени изменения пород. При этом возникает вопрос об источниках калия для накопления его в метасоматически измененных разновидностях. Мы считаем, что источником калия являются глубинные малоизмененные кимберлиты, из которых калий выносятся гидротермальными растворами и накапливается в верхних частях кимберлитовой трубки.

В тр. Ботуобинская примечательно отсутствие представителей поверхностной части трубки, т. е. собственно коры выветривания. Образование окварцованных кимберлитов главным образом приурочено к приповерхностным частям трубки, однако, они встречаются и на больших глубинах.

Одним из важных вопросов происхождения окварцованных кимберлитов является выявление источников накапливающихся в них глинозема и железа. Проблема состоит в том, что количества этих оксидов не могут быть получены по элювиальной модели: обогащение нерастворимого осадка в процессе выноса растворимых компонентов. Если для пород среднего и основного составов эта модель в какой-то мере может быть принята, так как увеличение количества Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в зонах гидролиза происходит в 1.2—2 раза, а ΣFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — в 2—4 раза, то в кимберлитах увеличение количества глинозема в отдельных образцах достигает 21 %, в среднем 14 %, т. е. в среднем более чем в 4 раза при незначительном накоплении свободного кремнезема, что противоречит элювиальной модели.

Объяснение этого явления было дано в рамках гидротермально-вадозной гипотезы [Разумова, 1977] формирования кор выветривания локального и площадного типов. В.Н. Разумова аргументировала гидро-



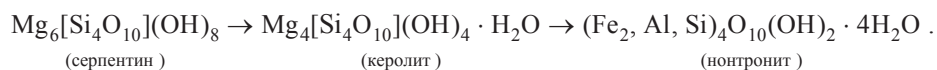
Таблица 12. Коэффициенты корреляции породообразующих оксидов с РЗЭ ( $r_{01} = 0.29$ )

Оксид	La	Nb	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu	$\Sigma_{\text{лег}}$	$\Sigma_{\text{тяж}}$	$\Sigma_{\text{лег}}/\Sigma_{\text{тяж}}$
TiO <sub>2</sub>	0.78	0.76	0.31	0.83	0.86	0.82	0.55	0.46	0.79	0.72	0.61
CaO	0.71	0.48	0.19	0.55	0.57	0.62	0.56	0.53	0.59	0.62	0.32
MgO	-0.69	-0.52	-0.22	-0.58	-0.59	-0.63	-0.54	-0.49	-0.60	-0.61	-0.36

Таблица 13. Средние содержания (г/т) и стандартные отклонения элементов редких земель в кимберлитах разной степени вторичного изменения

Элемент	2	3		4		5		6	
	Доломитиз.	Кварцосодержащий кимберлит							
	(1)	(6)		(32)		(33)		(8)	
	$x$	$x$	$s$	$x$	$s$	$x$	$s$	$x$	$s$
La	12.6	22.6	12.8	14.5	6.1	13.9	6.6	13.2	2.7
Nd	18.4	24.0	10.8	16.4	9.6	14.7	6.1	15.1	3.8
Sm	4.6	5.5	2.2	3.9	1.9	4.4	5.2	3.6	1.0
Eu	0.9	1.5	0.6	1.0	0.5	0.9	0.4	1.0	0.2
Gd	3.5	4.5	1.6	3.2	1.4	2.9	0.9	3.0	0.8
Tb	0.5	0.6	0.3	0.4	0.2	0.4	0.1	0.4	0.1
Yb	0.8	0.8	0.3	0.7	0.2	0.7	0.1	0.7	0.1
Lu	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
$\Sigma_{\text{лег}}$	36.4	53.5	26.2	35.7	17.3	33.9	14.8	32.0	7.7
$\Sigma_{\text{тяж}}$	4.9	6.0	2.2	4.4	1.8	4.0	1.1	4.2	0.9
$\Sigma_{\text{лег}}/\Sigma_{\text{тяж}}$	7.4	8.6	1.2	8.0	1.0	8.2	1.4	8.2	0.7
Q, %	-2.13	2.45		5.09		7.34		10.05	

термально-вадозную гипотезу на примере нонтронитового профиля кор выветривания серпентинитов Южного Урала, последовательность процессов в которой иллюстрируется следующей схемой:



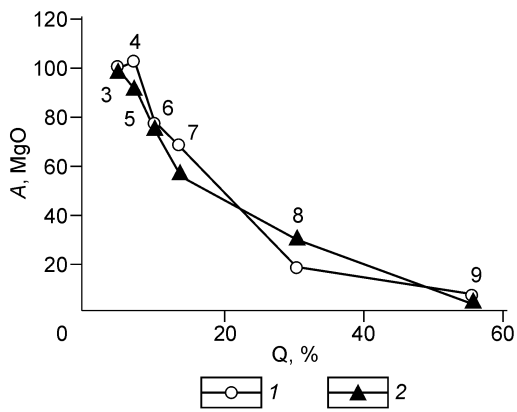
Гидротермально-вадозный генезис пород «нонтронитового профиля» подтверждается также и тем, что нонтронит не может быть получен простым гидролитическим выщелачиванием из неизменных керолитизированных серпентинитов — пород бедных железом и алюминием. В.Н. Разумова считала, что процесс формирования нонтронита без привноса железа, алюминия и кремния невозможен. Нонтронитизация керолитизированных серпентинитов осуществлялась при участии поступающих с глубин разбавленных гидротермальных растворов, обогащенных алюминием, железом и кремнием.

Таким образом, источником глинозема в окварцованных кимберлитах являются гидротермальные растворы, переносащие глинозем из глубинных частей трубки в ее приповерхностные горизонты. Окончательное формирование кимберлитов с наибольшим содержанием Q происходит при выносе всех компонентов кроме SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Редкие элементы.** Редкие элементы, подобно породообразующим оксидам, при вторичном изменении кимберлитов испытывают значительное перераспределение (см. табл. 10).

**Редкоземельные элементы (РЗЭ).** Ранее нами было установлено наличие сопряженности между содержаниями РЗЭ и породообразующими оксидами в кимберлитах тр. Айхал [Василенко и др., 2005]. Достоверные положительные связи установлены для содержаний РЗЭ и CaO, TiO<sub>2</sub> и  $\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Изучение сопряженности содержаний РЗЭ с содержаниями породообразующих оксидов в неизменных кимберлитах тр. Ботуобинская (см. [Василенко и др., 1997], Приложение 2) подтвердило наличие этих и других корреляционных зависимостей (табл. 12). Как видно, содержания MgO отрицательно коррелируются с содержаниями почти всех РЗЭ в кимберлитах. Особенности поведения РЗЭ в кимберлитах разной степени изменения исследовались на специально отобранной коллекции (табл. 13). Сравнение групповых средних (см. табл. 10, 13) показало, что вторичные процессы, происходящие на фоне постоянного выноса MgO, приводят к снижению содержаний РЗЭ в породах даже в группах наименее измененных кимберлитов.



**Рис. 7.** Изменение значений групповых содержаний *A* (1) и MgO (2), нормированных на содержания в гр. 3, в связи с изменением содержаний вторичного нормативного кварца (см. табл. 5).

Цифрами обозначены номера групп кимберлитов.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предположение о том, что нормативный кварц (Q) в кимберлитах может выступать в качестве индикатора интенсивности проявления вторичных процессов, полностью оправдалось. Совместное с Q изменение содержаний других оксидов, особенно MgO, позволяет отделить кварц, не связанный с процессами разложения оливина и флогопита, в

том числе кварц из ксенолитов вмещающих пород и гидротермальный кварц иных генетических систем. Чужеродные для кимберлитов количества кварца должны находиться вне отрицательной линии регрессии SiO<sub>2</sub>—MgO. Аналогично может быть проверена сингенетичность измененным кимберлитам находящимся в них алмазов. Для тр. Ботуобинская сингенетичность находящихся в измененных кимберлитах алмазов очевидна из рис. 7.

Возможность появления ювенильного кварца полностью отрицается, и весь SiO<sub>2</sub> связан в оливине и флогопите.

Типоморфные особенности собственно вторичного кварца имеют важное значение, так как они дают возможность отличать кварц кимберлитов от кварцев другого генезиса. По данным М.Я. Каца и И.М. Симановича [1974], кварц из метаморфических пород характеризуется плотностью 2.640—2.680, из гранитоидов — 2.645—2.690, из кварцевых жил — 2.630—2.680 г/см<sup>3</sup>. Наличие в элювиальных отложениях даже единичных образцов кварцев с плотностью менее 2.630 г/см<sup>3</sup> должно рассматриваться как благоприятный признак для поиска коренных выходов кимберлитов.

Распределение Q в кимберлитах дает возможность оценить последовательность выноса породообразующих оксидов и редких элементов и относительную устойчивость отдельных элементов к постмагматическому метасоматозу. Например, содержания Rb не меняют своих значений во всех группах кварцсодержащих кимберлитов, тогда как содержания La резко падают при увеличении содержаний Q примерно на 2.5 %. Это обстоятельство обязательно нужно учитывать в исследованиях поведения редких земель в кимберлитах.

Большое практическое значение могут иметь перераспределения редких элементов в окварцованные кимберлиты. Эти породы в тр. Ботуобинская содержат Cr в 3 раза, Ba — в 4 раза, Sr — в 6 раз больше, чем в алевритоглинистых сланцевых типах осадочных пород [Виноградов, 1962; Химия..., 1964; Кокин, Кокина, 1988]. Уникальным оказывается распределение Ni в окварцованных кимберлитах — оно в 14 раз больше, чем в осадочных породах сходного состава. Отмеченные аномальные содержания элементов могут оказаться полезными для отличия окварцованных кимберлитов от пород осадочного генезиса.

При нарастании Q в измененных кимберлитах перераспределяются химические элементы и в некоторых минералах. Например, в малиновых гранатах в кварцсодержащих кимберлитах происходит вынос Cr и Ca уже на начальных стадиях метасоматического изменения кимберлитов. Этот процесс ухудшает оценки перспективности кимберлитов, основанные на составе малиновых гранатов: перспективные составы гранатов могут рассматриваться как неперспективные.

Чрезвычайно важным следствием исследования информационных возможностей распределения Q является заключение о выносе алмаза из окварцованных пород. Этот вывод, подтвержденный заключением об уменьшении среднего веса кристаллов алмаза как в кварцсодержащих, так и в (особенно) окварцованных кимберлитах, позволяет считать, что растворение алмаза возможно при температурах <500 °С.

По Э.А. Шамшиной с соавторами [Шамшина и др., 1988], в кимберлитах, измененных под воздействием траппового силла, кристаллы алмаза в процессе растворения приобретают овальную форму. Наши данные позволяют предположить, что россыпи по преимуществу овальных кристаллов алмаза, формировались за счет сильноизмененных кимберлитов.

По Д.С. Коржинскому [1955], процесс метасоматического растворения кристаллов предполагает проявление и некоторой перекристаллизации. В связи с этим нельзя исключать и некоторую регенерацию растворимых кристаллов алмаза.

### ВЫВОДЫ

Предложенные алгоритмы расчета Q по силикатным анализам пород дают объективную оценку степени изменения кимберлитов. Исследование распределений Q и на их фоне распределения других

признаков и характеристик кимберлита позволяют эффективно исследовать последствия постмагматического гидротермально-метасоматического изменения кимберлитов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бетехтин А.Г.** Курс минералогии. М., Госнаучтехиздат, 1956, 558 с.
- Василенко В.Б., Холодова Л.Д.** Параметры элементарной ячейки кварца разного генезиса // Геология и геофизика, 1973 (5), с. 21—25.
- Василенко В.Б., Холодова Л.Д., Блинчик Т.М.** Математическая статистика. Проблемы, алгоритмы, программы. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1982, 133 с.
- Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г.** Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. Новосибирск, Наука, 1997, 574 с. <http://www.uiggm.nsc.ru/load/load.html>
- Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г.** Об эффективности использования вторичного кварца кимберлитов при поиске алмазных месторождений // Прогнозирование, поиски, разведка и эксплуатация месторождений алмазов и других полезных ископаемых. Мирный, Изд-во «Мирнинская городская типография», 1998, с. 242—244.
- Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Красавчиков В.О., Будаев Д.А., Кузнецова Л.Г.** Критерии петрохимической идентификации кимберлитов // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (12), с. 1748—1759.
- Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Минин В.А.** Редкие земли и другие малые и летучие элементы в свете структурных особенностей кимберлитов и их алмазоносности (на примере трубки Айхал, Якутия) // Геология алмазов — настоящее и будущее. Воронеж, ВГУ, 2005, с. 773—784.
- Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Минин В.А., Холодова Л.Д.** Средние составы кимберлитовых тел Вилюйской субпровинции Якутии как основа для формационной идентификации кимберлитов // Вестн. ВГУ, Серия: геология, 2006, с. 126—140.
- Виноградов А.П.** Среднее содержание химических элементов в главных типах горных пород земной коры // Геохимия, 1962, № 7, с. 26—38.
- Добрецов Н.Л., Кочкин Ю.П., Кривенко А.П., Кутолин В.А.** Породообразующие пироксены. М., Наука, 1971, 454 с.
- Дорошев А.М., Брей Г.П., Гирнис А.В., Туркин А.И., Когарко Л.Н.** Гранаты пироп-кноррингитового ряда в условиях мантии Земли: экспериментальное изучение в системе  $MgO-Al_2O_3-SiO_2-Cr_2O_3$  // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 523—545.
- Зайцев А.И., Корнилова В.П., Фомин А.С., Томшин М.Д.** О возрасте кимберлитовых пород Накынского поля (Якутия) // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж, ВГУ, 2001, с. 47—54.
- Занкович Н.С., Зинчук Н.Н.** Петрографо-минералогическая характеристика кимберлитовых пород разных фаз внедрения трубок Накынского поля // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж, ВГУ, 2001, с. 54—73.
- Зинчук Н.Н.** Постмагматические минералы кимберлитов. М., Недра-Бизнес-Центр, 2000, 538 с.
- Кац М.Я., Симанович И.М.** Кварц кристаллических горных пород (минералогические особенности и плотностные свойства). М., Наука, 1974, 187 с. (Труды Геол. ин-та, вып. 259).
- Классификация и номенклатура магматических горных пород:** Справочное пособие / Е.Д. Андреева, О.А. Богатилов, М.Б. Бородаевская, В.И. Гоньшакова. М., Недра, 1981, 136 с.
- Кокин А.В., Кокина Т.И.** Региональные кларки (геофон) пород Юго-Восточной Якутии // Топо-минералогия и типоморфизм минералов. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1988, с. 114—124.
- Коржинский Д.С.** Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 335—456.
- Крамер Г.** Математические методы статистики: Пер. с англ. М., Мир, 1975, 648 с.
- Литвин Ю.А.** О происхождении кимберлитовой ассоциации пород и минералов // Очерки физико-химической петрологии, 1984, вып. 12, с. 15—38.
- Методические основы исследования химического состава горных пород и минералов /** Ред. Г.В. Остроумов. М., Недра, 1979, 400 с.
- Милашев В.А.** Кимберлиты и глубинная геология. Л., Недра, 1990, 167 с.
- Пелл Дж.А.** Кимберлиты кратона Слейв, Северо-Западные Территории, Канада (предварительный обзор) // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 9—18.
- Разумова В.Н.** Древние коры выветривания и гидротермальный процесс. М., Наука, 1977, 156 с. (Труды ГИН АН СССР, вып. 303).
- Химия земной коры /** Ред. А.П. Виноградов. М., Наука, 1964, т. II, 395 с.
- Шамшина Э.А.** Коры выветривания кимберлитовых пород Якутии. Новосибирск, Наука, 1979, 150 с.

**Шамшина Э.А., Крючков А.И., Роговой В.В., Лелюх М.И., Жихарева В.П., Алтухова З.А., Зольников Г.В., Зудин Н.Г., Сомов С.В.** Минералогические особенности кимберлитовых пород, измененных под воздействием траппового силла // *Топоминералогия и типоморфизм минералов*. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1988, с. 47—55.

**Agashev A.M., Fomin A.S., Watanabe T., Kuligin S.S., Pokhilenko N.P.** Preliminary age determination of recently discovered kimberlites of the Siberian kimberlite province // VII International kimberlite conference. Extended Abstracts. Cape Town, 1998, p. 9—10.

**Chalapathi Rao N.V., Gibson S.A., Pyle D.M., Dickin A.P.** Petrogenesis of Proterozoic lamproites and kimberlites from the Cuddapah Basin and Dharwar Craton, Southern India // *J. Petrol.*, 2004, v. 45, № 5, p. 907—948.

**Clement, C.Ir.** A comparative geological study of some major kimberlite pipes in northern Cape and Orange Free State // Ph.D. thesis, University of Cape Town, 1982, p. 75—78.

**Graham I., Burgess J.L., Bryan D., Ravenscroft P.J., Thomas E., Doyle B.J., Hopkins R., Armstrong K.A.** Exploration history and geology of the Diavik kimberlites, Lac de Gras, Northwest Territories, Canada (tabl. 3) // VII International kimberlite conference. Cape Town, 1998, v. 1, p. 262—279.

**Greenwood J.C., Gibson S.A., Thompson R.N., Weska R.K., Dickin A.P.** Cretaceous kimberlites from the Paranatinga-Batovi region, Central Brazil: geochemical evidence for subcratonic lithospheric mantle heterogeneity // VII International kimberlite conference. Cape Town, 1998, v. 1, p. 291—298.

**Hsu L.C.** Selected phase relationships in the system Al—Mn—Fe—O—H: a model for garnet equilibria // *J. Petrol.*, 1968, v. 9, № 1, p. 40—83.

**Nixon P.H., Boyd F.R.** The Lighobong Intrusions and kimberlitic olivine composition // *Lesotho Kimberlites*, 1973, p. 141—148.

**Nixon P.H.** The geology of Monthae, Solane, Thaba Putsoa and Blow 13 // *Lesotho Kimberlites*, 1976, p. 39—47.

**O'Brien H.E., Tyni M.** Mineralogy and geochemistry of kimberlites and related rocks from Finland // VII International kimberlite conference. Cape Town, 1998, v. 2, p. 625—636.

**Seggie A.G., Hannweg G.W., Colgan E.A., Smith C.B.** The geology and geochemistry of the Venetia Kimberlite Cluster, Northern Province, South Africa // VII International kimberlite conference. Cape Town, 1998, v. 2, p. 750—756.

**Skinner E.M.W., Apter D.B., Morelli C., Smithson N.K.** Kimberlites of the Man Craton, West Africa // VIII International kimberlite conference, 2004, v. 1, p. 233—259.

**Smith C.B., McCallum M.E., Coopersmith H.G., Egger D.H.** Petrochemistry and structure of kimberlites in the Front Range and Laramie Range, Colorado-Wyoming — kimberlites, diatremes and diamonds // *The geology, petrology and geochemistry* / Eds. F.R. Boyd, H.O.A. Meyer. Washington, DC. 20006, Amer. Geophys. Union, 1979, p. 178—189.

**Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Krasavchikov O.V., Kuznetsova L.G., Khlestov V.V., Volkova N.I.** Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry // *J. Geochem. Explor.*, 2002, v. 76, v. 2, p. 93—112.

**Yoder H.S.Jr.** Almandite stability range // *Amer. Miner.*, 1955, v. 40, p. 342.

*Рекомендована к печати 21 апреля 2008 г.  
В.В. Ревердатто*

*Поступила в редакцию  
19 ноября 2007 г.*