

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ИНТЕНСИВНОСТИ ПОСТМАГМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ
КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТИИ И АФРИКИ**В. Б. Василенко¹, А. Я. Ротман², Л. Г. Кузнецова¹, В. А. Минин¹, Н. Н. Зинчук², Л. Д. Холодова¹¹Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск²АК «АЛРОСА», ЯНИГП ЦНИГРИ, г. Мирный

Изучение вторичных процессов изменения кимберлитов проведено по 930 силикатным анализам керна из скважин трубки Мир (Якутия) и трубки «К» Анголы.

Массоперенос при вторичном изменении кимберлитов эффективно рассматривать на фоне изменения показателя Q — нормативного вторичного кварца. Приведен алгоритм расчета Q для каждого силикатного анализа. Относительно слабо измененные кимберлиты трубки Мир и весьма значительно измененные кимберлиты трубки «К» характеризуются изменением Q до 25 % в первой и до 80 % во второй.

Незначительно измененные кимберлиты обеих трубок характеризуются близким химическим составом. Составы всех исследованных кимберлитов трубки Мир и африканской трубки значительно различаются из-за разной проявленности вторичных процессов. В трубке Мир развиты преимущественно кварцосодержащие кимберлиты, а в африканской трубке — окварцованные.

Главным, наиболее ранним проявлением переноса вещества при вторичных изменениях является вынос калия из глубинных частей и локализация его в приповерхностных частях трубок.

Петрохимические тренды при формировании окварцованных кимберлитов в изученных трубках принципиально не различимы. Здесь наиболее четко проявлены вынос магния и накопление Al_2O_3 . Кимберлиты разной степени вторичного изменения в обеих трубках встречаются как в приповерхностных, так и в глубинных частях трубок.

Использование значений нормативного кварца при изучении вторичного массопереноса оказалось эффективным как в незначительно, так и в значительно измененных породах.

Показатель Q использован для проверки генетических гипотез. Согласно одной из них в африканской трубке имеются значительные объемы вмещающих осадочных пород. Распределение Q по разрезам скважин показало, что во всех случаях оно подчиняется закономерностям, свойственным продуктам инфильтрационного метасоматоза, на основании чего гипотеза об осадочных породах отвергнута.

Ключевые слова: кимберлит, постмагматическое изменение, нормативный кварц.

ВВЕДЕНИЕ

Петрохимические следствия вторичного изменения кимберлитов детально охарактеризованы в работах Э. А. Шамшиной [1], Н. Н. Зинчука с соавторами [2, 3, 4] и др. В. Б. Василенко с соавторами акцентировали внимание на вторичных изменениях глубинных частей кимберлитовых трубок [5, 6].

Суть процессов постмагматического изменения кимберлитов состоит в гидратации оливина и флогопита — главных, наряду с магматическим кальцитом, породообразующих минералов этих пород. Выделяющийся при гидратации кремнезем характеризуется инертным поведением и накапливается

в изменяющихся породах. Большая часть других породообразующих оксидов выносится гидротермальными растворами вовне. Отношение содержащий выносимых компонентов к количеству накопленной кремнекислоты некоторые исследователи используют в качестве показателя относительной скорости выноса отдельных элементов. Так, Э. А. Шамшина [1] отмечала, что отношение $MgO_{\text{сил.}}/SiO_2$ показывает степень выщелачивания магния из силикатных минералов. В интервале 0,8–0,5 это отношение отражает различную степень монтмориллонитизации серпентина. Величина $MgO_{\text{сил.}}/SiO_2$ ниже 0,5 свидетельствует о полном разложении серпентина и образовании на его месте монтмориллонита и нонтронита. Как видно, вынос магния происходит на фоне накопления кремнекислоты. Нами ранее было показано [7], что

© Василенко В. Б., Ротман А. Я., Кузнецова Л. Г., Минин В. А., Зинчук Н. Н., Холодова Л. Д., 2008

при вторичном изменении кимберлитов между содержаниями MgO и SiO_2 имеет место хорошо выраженная отрицательная зависимость. В силу этого в качестве показателя степени вторичного изменения кимберлитов мы предложили использовать количество некомпенсированной кремнекислоты (Q), которое может меняться от нескольких процентов до 90 % объема породы. Поведение других оксидов в измененных породах оценивается на фоне накопления некомпенсированной кремнекислоты. По имеющимся у нас данным в продуктивных кимберлитах Якутии (трубки Интернациональная, Мир, Ботуобинская, Нюрбинская, Айхал, Юбилейная, Сытыканская, Удачная-западная, Удачная-восточная) количество измененных пород с содержанием Q более 12 % колеблется от 2 до 27 % объема породы. В этих пределах изменения Q хорошо фиксируются параллельные изменения других породообразующих оксидов и редких элементов.

Однако встает вопрос о том, как будут изменяться особенности химического состава пород с изменением содержаний Q при высоких степенях изменения пород и значительных содержаниях Q.

Для ответа на поставленный вопрос в данной работе рассмотрены изменения химизма кимберлитов в гипергенном процессе на примере одной из наиболее известных трубок Якутии — трубки Мир и одной, не менее известной, трубки «К» Анголы.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Трубка Мир. Трубка открыта в 1955 г. геологами Амакинской экспедиции. В составе трубки выделен мелкообломочный кимберлитовый туф, который представлен серо-зеленой, темно-зеленой и зелено-желтой разновидностями. Последние слагают приконтрактную юго-западную часть трубки [8]. А. П. Бобриевич с соавторами [9] уточнили, что грубообломочные туфобрекчии слагают обособленные участки в виде блоков, напоминающих кимберлитовые столбы в диатремах Африки [10].

Описывая в трубке Мир включения кимберлитов в кимберлитах, Е. В. Францесон [11] считала, что они могли образоваться при остывании и повторном дроблении застывшей породы, из чего следует модель многоэтапного формирования трубки. А. И. Боткунов [12] выделил в трубке Мир шесть типов кимберлитов, различающихся по количеству основной массы, количеству и составу слагающих кимберлиты минералов, по геологоструктурному положению и типу алмазности пород. Причину многообразия слагающих трубку кимберлитов А. И. Боткунов видел в разновремен-

ности и многократности процессов кимберлитобразования. Модель строения трубки Мир по А. И. Боткунову в последующем не стала общепризнанной, хотя мы считаем, что она в наибольшей мере была приближена к действительности. Ниже при описании петрохимической модели трубки Мир мы подчеркнем это обстоятельство.

В последующие годы при разделении кимберлитов на разновидности главную роль стали играть текстурно-структурные свойства пород, и большинство исследователей стали видеть в трубке Мир только три самостоятельные фазы внедрения [13, 14, 15].

По последним данным А. Д. Харькива с соавторами [16], трубка Мир прорывает карбонатно-терригенные отложения кембрийской системы. Примечательно, что в разрезе вмещающих пород начиная с глубины 500 метров (и особенно на глубине 900–1200 м) встречаются пласты глины, каменной соли, гипса и ангидрида, которые резко повышают содержания Na_2O в контаминированных кимберлитах. На глубине 760–810 м выделен блок слабо измененных кимберлитов.

По данным Э.А. Шамшиной [1], на кимберлитовых брекчиях трубки Мир кора выветривания сохранилась спорадически. Мощность ее колеблется от первых метров до 20–30 м. На глубине 40–50 м следы заметного выветривания исчезают. По минеральным новообразованиям в зоне гипергенеза сохранившаяся в трубке Мир кора выветривания является остаточной хлорит-монтмориллонитового состава. Возможно, что значительная верхняя часть профиля коры выветривания на трубке была удалена эрозией.

Итак, вторичные процессы в кимберлитах глубинных частей трубки Мир предыдущими исследователями не описаны.

Трубка «К» Анголы. Поле, в состав которого входит рассматриваемая трубка, расположено в бассейне реки Шикапа, в северо-восточной части Анголы. Форма трубки в плане почти изометрична. Внутреннее строение трубки достаточно сложно. Ее центральная часть площадью около 220 тыс. м² сложена вулканогенно-осадочными породами, слагающими чашеподобное тело в кратерной части, достигающее глубины 270 м от дневной поверхности. По периферии в виде кольцевой зоны шириной от 150 до 250 м располагаются кимберлитовые туфы и туфобрекчии, а в южной части карьером вскрыты порфириновые кимберлиты. Во вскрытом карьером и скважинами разрезе уверенно выделяются гетерогенные груп-

пы пород двух фаций кимберлитового вулканизма: жерловой и кратерной, а также кимберлиты, предположительно, гипабиссальной вулканической субфации [5].

О процессах вторичного изменения кимберлитов африканской трубки в литературе не сообщается.

ПЕТРОХИМИЯ КИМБЕРЛИТОВ

Фактический материал. Кимберлиты трубки Мир охарактеризованы 687 силикатными анализами. Африканская трубка соответственно — 233 силикатными анализами.

Всего в исследовании задействовано 920 силикатных анализов пород.

Распределение частот концентраций породообразующих оксидов в изучаемых трубках показано на рис. 1. Почти полное несовпадение полигонов частот может быть обусловлено как изначальным различием составов кимберлитов сравниваемых трубок, так и разной степенью проявления вторичных процессов. Например, различия по содержаниям SiO_2 и Al_2O_3 однозначно обусловлены постмагматическими процессами. Более детально происхождение различий в распределении породообразующих оксидов можно выявить на фоне изменяющихся количеств некомпенсированной кремнекислоты.

Количество некомпенсированной кремнекислоты (*нормативный кварц (Q)*) вычисляется для каждого силикатного анализа кимберлитов. Расчет Q производится на основе средних составов главных породообразующих минералов кимберлита, а также минералов-примесей — диопсида и доломита (табл. 1).

В полном виде алгоритм вычисления Q, предложенный Л. Г. Кузнецовой, изложен в работе В. Б. Василенко с соавторами [20]. В нашем случае для расчета Q использовано следующее уравнение: $Q = \text{SiO}_2 - 0,81 \times \text{MgO} - 2,80 \times \text{K}_2\text{O}$.

Содержания нормативного кварца Q вычисляется в весовых процентах. Оказалось, что в трубке Мир значения Q меняются от -3,0 до 25,0 %, а в африканской трубке — от 12,0 до 80,0 %. В рассматриваемых трубках, таким образом, мы имеем непрерывный ряд составов от пород, лишенных Q, до пород, практически состоящих только из этого компонента. Вся совокупность данных на следующем этапе была разделена на 14 групп с последовательно возрастающими средними содержаниями Q от 2,86 до 64,34 %. Поскольку для среднего состава кимберлитов Якутской провинции ($\text{SiO}_2 = 26,73$, $\text{TiO}_2 = 1,34$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,70$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6,73$, $\text{MgO} = 25,42$, $\text{CaO} = 14,04$, $\text{Na}_2\text{O} = 0,13$, $\text{K}_2\text{O} = 0,58$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,50$, Ппп = 21,84), полученного по 7537 силикатным анализам [21], величина $Q = 4,52$ %, то кимберлиты со значением Q до 5 % будем считать неизменными. Отрицательные значения Q генерируются вторичной доломитизацией кимберлитов.

Модели распределения Q. В исследованных трубках особенности распределения значений Q показаны в таблицах 2 и 3. Здесь различия в степени вторичного изменения кимберлитов сравниваемых трубок выражены наиболее выпукло: в трубке Мир присутствуют группы измененных кимберлитов с 1-й по 12-ю, а в африканской трубке — с 8-й по 14-ю. Относительное содержание кварцсодержащих (измененных в незначительной степени) кимберлитов в трубке Мир составляет около 80 %, а в африканской трубке — только 12 %. Напротив, содержание окварцованных (измененных в значительной степени) кимберлитов в трубке Мир составляет 20 %, а в африканской трубке — около 90 %.

Следовательно, значительно измененные кимберлиты составляют 90 % исследованных образцов африканской трубки и только 20 % образцов из трубки Мир.

Химический состав незначительно измененных (кварцсодержащих) кимберлитов изучаемых тру-

Таблица 1

Средние составы минералов в кимберлитах*

Минерал	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂
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

*Составы оливина и флогопита даны по В. А. Милашеву [17], диопсида — по Н. Л. Добрецову с соавторами [18], кальцита и доломита — по А. Г. Бетехтину [19].

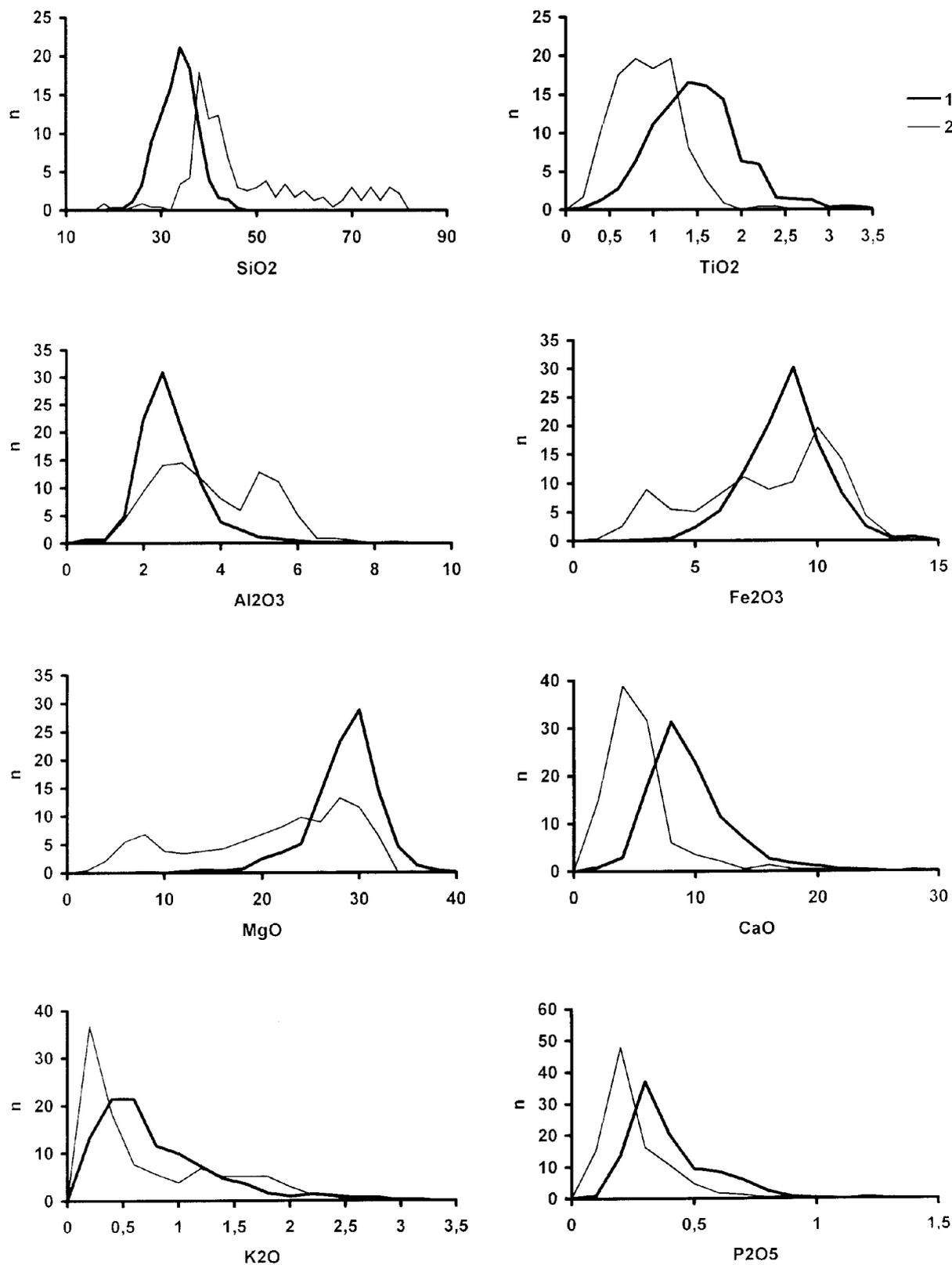


Рис. 1. Распределения относительных частот содержаний породообразующих оксидов:
1 — трубка Мир, 2 — трубка «К»

Таблица 2

Средние составы кимберлитов разной степени изменения в трубке Мир

Кимберлит	Доломитизированный		Кварцосодержащий						Окварцованный			
	№ группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кол-во анализов	2	19	39	65	111	108	130	105	82	41	20	3
Q	-2,86	-0,55	1,20	3,07	5,09	6,98	8,96	10,88	13,45	16,19	20,14	24,27
SiO ₂	25,28	26,81	27,35	28,07	30,74	31,55	33,07	34,61	35,87	37,88	40,26	43,06
TiO ₂	1,51	1,75	1,75	1,64	1,40	1,50	1,45	1,31	1,12	0,99	1,07	1,23
Al ₂ O ₃	3,02	1,81	1,88	2,20	2,32	2,37	2,36	2,64	2,93	2,93	3,76	7,95
ΣFe ₂ O ₃	6,25	9,79	9,27	8,80	7,76	8,23	8,3	8,61	7,97	7,48	6,76	6,61
MnO	0,11	0,12	0,12	0,14	0,13	0,11	0,10	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11
MgO	30,69	30,38	29,20	27,74	28,94	28,27	28,06	27,20	25,23	23,84	22,21	13,05
CaO	9,61	9,25	9,81	10,92	9,23	8,75	7,69	7,25	7,81	7,90	7,70	9,83
Na ₂ O	0,12	0,43	0,30	0,23	0,20	0,22	0,25	0,25	0,37	0,83	0,36	0,64
K ₂ O	1,26	0,89	0,89	0,90	0,79	0,60	0,49	0,61	0,71	0,85	0,76	2,93
P ₂ O ₅	0,34	0,55	0,59	0,53	0,39	0,35	0,29	0,27	0,25	0,26	0,27	0,32
Ппп	20,03	18,35	19,30	19,02	18,17	18,05	17,81	17,33	17,63	17,04	16,85	14,26

Таблица 3

Средние составы кимберлитов разной степени изменения в трубке «К» Анголы

Кимберлит	Кварцосодержащий	Окварцованный					
		№ группы	8	9	10	11	12
Кол-во анализов	28	35	24	20	42	50	34
Q	10,40	13,88	16,31	19,17	24,32	39,94	64,34
SiO ₂	33,89	36,74	38,83	38,97	42,77	54,23	73,71
TiO ₂	1,01	1,06	0,96	1,00	0,74	0,80	0,46
Al ₂ O ₃	2,13	2,59	2,87	3,23	3,98	4,35	4,92
ΣFe ₂ O ₃	10,10	9,94	9,28	8,95	7,35	6,18	2,94
MnO	0,15	0,14	0,13	0,14	0,13	0,13	0,11
MgO	28,09	27,34	26,91	24,47	20,63	14,51	6,37
CaO	6,40	5,31	4,22	5,36	4,67	4,16	2,50
Na ₂ O	0,05	0,18	0,25	0,50	0,20	0,16	0,49
K ₂ O	0,27	0,26	0,26	0,28	0,62	0,91	1,50
P ₂ O ₅	0,27	0,30	0,21	0,22	0,25	0,22	0,10
Ппп	13,80	13,03	12,56	14,21	12,10	9,81	3,87

бок. Корректность проводимых сравнений обусловливается близостью химических составов кимберлитов трубки Мир и ангольской трубки. В этом можно убедиться, сравнивая популяционные петрохимические модели трубок, построенные на основании петрохимической классификации кимберлитов по В. Б. Василенко и Л. Г. Кузнецовой (табл. 4).

Согласно петрологическому наполнению приведенной классификации (табл. 4), 1-я популяция является наиболее глубокой и обычно наиболее алмазоносной при прочих равных условиях. Соответственно, 7-я популяция является наименее

глубокой и наименее алмазоносной. Анализ распределения популяций в разных трубках разных алмазоносных полей Якутской провинции показал [22], что каждая трубка в данном поле характеризуется набором двух в наибольшей степени представленных в теле трубки популяций кимберлитов (модальных популяций). Петрохимические сравнения трубок эффективнее проводить по наборам модальных популяций.

Популяционные модели описываемых трубок приведены в таблицах 5 и 6. Как видно, популяционная модель трубки Мир включает пять петрохимических популяций кимберлитов, что может

Таблица 4

Петрохимическая классификация пород вида кимберлитов

1-й уровень. Выделение популяций. Типохимический признак TiO ₂ , wt. %								
Граничные значения	< 0,4	0,41–0,60	0,61–1,00	1,01–1,40	1,41–1,80	1,81–2,20	2,21–2,80	
Номера популяций	1	2	3	4	5	6	7	
2-й уровень. Выделение разновидностей. Типохимический признак CaO/MgO								
Граничные значения								
от	> 8,2		1,75		0,82		0,33	
до	1,76		0,83		0,34		<0,18	
Название разновидности	Кимберлитовые карбонатиты (Крб)		Карбонатитовые кимберлиты (Са-кмб)		Кимберлиты (Кмб)		Магнезиальные кимберлиты (Mg-кмб)	

Таблица 5

Петрохимическая популяционная модель трубки Мир

Оксиды	Популяция									
	3		4		5		6		7	
	Разновидность									
	Кмб (2,9)*	Mg-кмб (7,5)	Кмб (5,7)	Mg-кмб (24,6)	Кмб (9,1)	Mg-кмб (25,4)	Кмб (3,9)	Mg-кмб (9,5)	Кмб (2,0)	Mg-кмб (3,8)
SiO ₂	28,95	34,33	28,76	33,10	28,34	32,84	27,32	32,65	27,26	30,60
TiO ₂	0,80	0,84	1,25	1,22	1,64	1,58	2,02	1,99	2,56	2,57
Al ₂ O ₃	2,93	3,04	2,29	2,40	2,23	2,24	2,05	2,19	2,00	2,17
Fe ₂ O ₃	7,46	7,70	7,68	8,05	8,68	8,54	9,38	8,52	10,12	9,41
MgO	24,10	28,47	26,10	29,02	26,88	29,21	27,12	29,61	27,66	29,03
CaO	12,98	7,31	12,18	7,59	10,91	7,02	10,73	7,08	10,44	7,65
K ₂ O	1,07	1,02	0,79	0,70	0,65	0,54	0,50	0,50	0,53	0,52
P ₂ O ₅	0,41	0,32	0,47	0,33	0,48	0,31	0,54	0,34	0,55	0,45
Ппп	20,32	16,84	19,80	17,34	19,70	17,58	20,17	17,21	19,18	17,70

* Относительное содержание в трубке.

Таблица 6

Петрохимическая популяционная модель трубки «К»

Оксид	Популяция			
	2	3	4	5
	Разновидность			
	Mg-кмб (3,2)*	Mg-кмб (28,6)	Mg-кмб (49,2)	Mg-кмб (9,5)
SiO ₂	38,44	36,94	36,64	34,40
TiO ₂	0,58	0,86	1,15	1,48
Al ₂ O ₃	2,29	2,25	2,70	2,18
Fe ₂ O ₃	9,25	9,65	10,43	11,63
MgO	31,10	29,45	27,81	28,92
CaO	2,90	4,14	4,50	5,13
K ₂ O	0,14	0,18	0,34	0,31
P ₂ O ₅	0,16	0,22	0,33	0,36
Ппп	11,14	13,36	12,94	13,91

* Относительное содержание в трубке.

толковаться как отражение пяти главных фаз внедрения кимберлитовых расплавов. Нетрудно заметить сходство между популяционной версией

петрологии кимберлитов и ранее упоминавшейся схемой А. И. Боткунова [12]. Петрохимическая модель трубки «К» отличается некоторой неполнотой из-за отсутствия неизменных пород.

Модальными популяциями для трубки Мир являются 4-я и 5-я, а в африканской трубке наиболее представлена 4-я популяция. Кроме того, кимберлиты африканской трубки являются более магнезиальными, что в равных климатических условиях могло определить большую степень изменения слагающих ее кимберлитов. Кимберлиты трубки Мир в целом менее глубокие по сравнению с кимберлитами африканской трубки, но их химический состав во многом однотипен.

Итак, кимберлиты сравниваемых трубок характеризуются близким химическим составом.

Массоперенос при вторичном изменении кимберлитов. Таблицы 2 и 3 позволяют выявить особенности массопереноса при формировании кварцсодержащих кимберлитов в трубке Мир и при формировании окварцованных кимберлитов в обеих сравниваемых трубках.

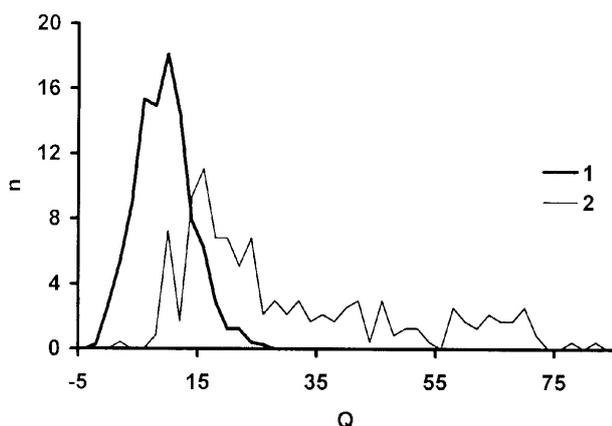


Рис. 2. Распределение содержаний нормативного кварца: 1 — трубка Мир, 2 — трубка «К»

Главным петрохимическим трендом при постмагматическом формировании кварцосодержащих кимберлитов является вынос из этих пород калия и накопление его в группах наиболее окварцованных кимберлитов, а также инертное поведение MgO на фоне увеличения количества Q. Это обстоятельство дает возможность считать проявление выноса калия более ранним процессом относительно процесса серпентинизации.

Итак, главным и наиболее ранним направлением переноса вещества при вторичном изменении кимберлитов является вынос калия из глубинных частей трубок и локализация его в приповерхностных частях.

Обсуждение процесса выноса калия из кварцосодержащих кимберлитов. Учитывая значимость этого явления, рассмотрим его несколько подробнее. В связи с этим напомним основные этапы постмагматического процесса в ультраосновно-щелочных комплексах с карбонатитами.

Впервые они описаны Бреггером [23] в открытой Гольдшмитом в 1918 г. [24] специфической ассоциации пород комплекса Фен.

Район Фен — один из центров взрыва, с которым ассоциирует огромное количество сателлитовых тел, прорывающих гранито-гнейсы. В составе комплекса Фен описаны уртиты, йолиты, якупирангиты и карбонатиты. Карбонатитовый шток сложен севитом (преобладает кальцит), раухаугитом (преобладает анкерит) и редбергитом (кальцит, анкерит с большим количеством гематита).

Комплекс карбонатных пород разделен на отдельные дуги прослоями силикатных пород с кальцитом. Для силикатно-карбонатных пород характерно интенсивное проявление гидротермаль-

но-метасоматических изменений, в результате которых по нефелину образуются агрегаты альбита, мусковита и хлорита, пироксен превращается в агрегаты биотита или хлорита и кальцита, и таким образом, породы замещаются агрегатами хлорита и кальцита.

Эти цитированные нами по Т. Барту и И. Рамбергу [24] изменения силикатных пород и являются, по-видимому, начальной стадией процесса так называемой фенитизации, или стадией эндоконтактной фенитизации, на которой связанные с карбонатитами и богатые кальцием и железом растворы переводят в подвижное состояние катионы силикатных минералов и переносят их в экзоконтакт, где в новых условиях, в данном случае гранито-гнейсовой среды, сбрасывают щелочные компоненты, производя собственно фенитизацию — метасоматическое изменение вмещающих пород.

Здесь необходимо обсудить объем термина «фенитизация». Термин «фенит» введен в геологическую литературу Бреггером [23], который так называл эгириновые и амфиболовые сиениты, образовавшиеся при экзоконтактовом изменении гранитов. В геологической литературе сложилось восприятие фенитов именно как гранитоидов, измененных в экзоконтактах щелочно-ультраосновных интрузий. Так А. А. Сергеев считает, что «...термин «фенитизация» следует понимать... и применять только в отношении экзоконтактового изменения пород «гранитоидного» состава: гнейсов, гранитов и некоторых терригенных пород — аркозов, песчаников и т. п.» [25, стр. 6].

Нам представляется неуместным столь прямолинейно выраженный петрографический консерватизм. Ведь основой явления фенитизации является вынос из интрузии щелочей, а не нахождение в экзоконтакте пород гранитоидного состава.

Если на примере интрузии Фен впервые были показаны характерные особенности эндоконтактных и экзоконтактных проявлений постмагматических гидротермально-метасоматических процессов, то именно за ними логичнее оставить термин «фенитизация», обозначив ее проявления в экзоконтактных гранитоидах как «фенитизацию гранитоидов». В таком контексте и постмагматические процессы в кимберлитах, относящихся, по существу, к ультраосновно-щелочным магматитам с неразделенными силикатной и карбонатитовой частями, должны рассматриваться как проявления фенитизации. Вынос калия на ранних стадиях изменения кимберлитов помимо трубки Мир фикси-

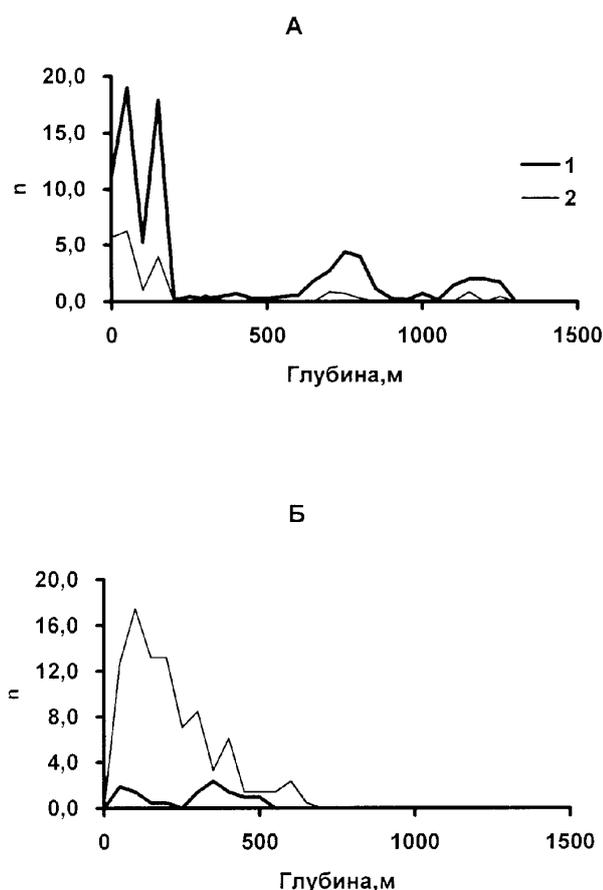


Рис. 3. Распределение по глубине кимберлитов разной степени изменения: 1 — кварцосодержащие, 2 — окварцованные кимберлиты. А — трубка Мир, Б — трубка «К»

ровался нами и в других трубках Якутии: Комсомольской, Нюрбинской, Ботубинской.

Массоперенос в окварцованных кимберлитах. Массоперенос при формировании окварцованных кимберлитов в обеих трубках характеризуется выносом MgO и накоплением SiO₂. Важной особенностью наиболее окварцованных кимберлитов является повышение в их составе содержания глинозема и, как отмечалось выше, K₂O.

Петрохимические тренды при формировании окварцованных кимберлитов в трубке Мир и африканской трубке принципиально не различимы, несмотря на разные масштабы развития этих пород. В окварцованных кимберлитах наиболее четко проявлен вынос магния и накопление Al₂O₃ и K₂O.

Распределение измененных кимберлитов в глубинных частях трубок. Исследованный фактический материал состоит из анализов образцов керна разведочных скважин, что позволяет выявить пространенность процессов постмагматического изменения кимберлитов на глубину. Это тем более

интересно, что в обычных исследованиях вторичных изменений кимберлитов рассматриваются лишь самые приповерхностные горизонты.

Распределение кварцосодержащих и окварцованных кимберлитов в обеих трубках на глубину противоречит представлениям о развитии вторичных процессов лишь в приповерхностных частях: группы кимберлитов разной степени изменения встречаются как в приповерхностных частях, так и на глубине (рис. 3).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ Q ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ НА ПРИМЕРЕ ТРУБКИ «К» ИЗ АНГОЛЫ

В качестве одного из практических применений метода расчета нормативного кварца в кимберлитах можно рекомендовать его использование для уточнения геологического строения трубок. Африканская трубка в этом отношении представляет собой хороший пример, т. к. по поводу ее геологического строения нет единого мнения и существует несколько генетических гипотез.

Альтернативные гипотезы. На примере пород, слагающих трубку «К», мы видим возможность проверить две гипотезы: первая предполагает, что исследованная в данной работе часть трубки интенсивно обогащена крупными фрагментами кварцосодержащих осадочных пород; вторая гипотеза предполагает отсутствие в составе трубки крупных фрагментов осадочных пород, а наблюдаемые кварцосодержащие породы относит к кимберлитам, сильно измененным вторичными процессами.

Критерием проверки альтернативных гипотез может выступить особенность распределения Q в теле трубки.

Вторая гипотеза может приниматься как вероятная в случае распределения Q в теле трубки или в отдельных ее частях по типу инфильтрационной метасоматической зональности: к центру зоны должно происходить накопление SiO₂ и последовательный вынос других оксидов. Отсутствие зональности метасоматического типа должно рассматриваться как аргумент для принятия первой гипотезы.

Первая гипотеза могла возникнуть в силу того, что окварцованные породы по составу соответствуют песчаникам с глинистым цементом, а ежегодные сезонные изменения уровня грунтовых вод создают вторичную слоистость, на основании которой исследователи, не знакомые с особенностями проявления измененных ультраосновных магматитов, приписывают гидротермально измененным

породам осадочный генезис. Основные аргументы сторонники первой гипотезы черпают из визуальных и микроскопических петрографических наблюдений.

Доказательства справедливости гипотезы об осадочных породах. В трубке «К» сторонники осадочной гипотезы образования кратерной части разделяют на две группы: вулканогенно-осадочные породы, синхронные вулканизму, и эпикластические образования. В вулканогенно-осадочных породах нижняя пачка сложена в основном туффитами кимберлитов, туфопесчаниками и песчаниками с примесью кимберлитового материала. В группу туфопесчаников и песчаников с примесью кимберлитового материала входят породы светло-бордового и оранжево-красного цвета, однородной окраски, псаммитовой и алевропсаммитовой структуры, состоящие в основном из кварцевого песка и алеврита с примесью кимберлитового материала – до исчезающе малого его содержания. Туфопесчаники макроскопически представляют собой породы светло-бордового цвета, однородной окраски. Текстура пород часто параллельно-слоистая за счет чередования слоев с преобладанием крупнопсаммитового или мелкопсефитового обломочного материала. Структура псаммитовая или мелкопсефито-псаммитовая.

Кимберлитовый материал (от долей процента до 5–10 %) представлен исключительно псевдоморфозами тонкочешуйчатого смектита по оливино неправильной или субидиоморфной формы, иногда со сглаженными очертаниями (отчетливо видно, что тонкочешуйчатый агрегат смектита замещает серпентин крупнопластинчатой и паркетной структур). В породе содержится обычно много минералов-спутников алмаза: пикроильменита (резко преобладает), пиропы без келифитовых кайм, хромдиоксида, а также сростков двух последних минералов.

Терригенная составляющая породы представлена кварцевым песчаным материалом, обычно хорошо сортированным: в одних зонах — крупнозернистым (0,5–1,0 мм), в других — мелкозернистым (0,2–0,3 мм). Иногда создается впечатление, что кварцевые зерна в разной степени замещены тонкочешуйчатым агрегатом хлорит-смектита. В меньшем количестве присутствуют зерна алмазина, полевого шпата, амфибола, а также обломки метаморфических пород (в основном амфиболитов). Цемент породы базально-порового и пленочно-порового типа, смектито-хлоритовый,

имеющий микрочешуйчатую, иногда крустификационную структуру.

Эпикластические породы — это песчаники с примесью кимберлитового материала. Цвет пород красный, оранжево-красный с кремовым оттенком, красновато-бурый с неоднородным распределением. Текстура слоистая (параллельная, линзовидная). Структура алевро-псаммитовая, псаммитовая, мелкопсефито-псаммитовая. Отличаются от туфопесчаников пониженным содержанием кимберлитового материала (менее 10 %), а также характером цемента (порового типа, глинистого, насыщенного гидроокислами железа). Минералы-спутники алмаза встречаются редко и только в отдельных мелкопсефитовых прослоях.

Главными аргументами первой гипотезы, таким образом, являются наличие слоистости в кварцсодержащих породах, а также близость петрографических характеристик кварца (псаммито-псефитовые размеры зерен, их гранобластовое ограничение, тесное соседство с хлорит-смектитовыми агрегатами, полосчатые текстуры) петрографическим характеристикам кварца осадочных пород.

Аргументы в пользу гидротермально-метасоматической гипотезы. Рассмотрим особенности распределения значений Q по разрезам разведочных скважин (табл. 7). В скважинах 135, 232, 333, 531, 737, 437, 632, 834, 335, 28, 635 отчетливо выделяются зоны, в которых от центра к периферии происходит постепенное падение содержаний Q, глинозема на фоне увеличивающихся концентраций MgO. Следует отметить, что при изучении постмагматически измененных кимберлитов других трубок мы установили аналогичную зональность [20].

Симметричные зоны постмагматически измененных кимберлитов распространены по всему исследованному разрезу от глубин 17 м к глубинам более 340 м. Средняя мощность зоны постмагматически измененных пород в исследуемой трубке составляет 100 м, при колебаниях от 20 до 200 м. Скважины 334 и 534 вскрыли несимметричный тип зональности измененных пород. Мощность собственно кварцевых пород в данном случае колеблется от 60 до 120 м. Залегают они как в приповерхностных, так и в более глубинных частях трубки.

Итак, распределения содержаний Q по разрезам скважин африканской трубки соответствуют модели гидротермально-метасоматического изменения кимберлитов по отдельным зонам с характерным симметричным или асимметричным типом строения этих зон.

Распределение значений Q по вертикальным разрезам трубки «К»

Скв.	Глубина, м	Q	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ппп
0135	17,0	31,28	46,37	0,75	3,97	6,64	17,84	5,33	0,23	0,20	6,12
	48,0	57,79	69,01	0,55	4,58	3,86	9,98	2,60	1,12	0,07	3,91
	58,0	62,02	72,20	0,36	4,94	3,15	8,11	1,77	1,29	0,05	1,97
	98,0	21,20	40,48	0,95	3,59	9,06	22,66	5,97	0,33	0,21	8,11
0232	70,0	11,60	36,63	0,89	1,81	10,04	30,52	3,80	0,11	0,11	10,97
	90,0	17,25	41,40	0,58	2,24	9,81	29,33	2,77	0,14	0,12	8,39
	100,1	45,00	60,37	0,48	3,78	4,20	18,29	1,87	0,20	0,12	5,77
	120,0	34,31	50,66	1,03	3,45	7,08	17,38	3,37	0,81	0,15	5,91
	170,0	21,60	40,44	0,69	3,14	7,74	22,40	4,86	0,25	0,21	6,93
0333	20,0	45,81	54,67	0,19	3,41	1,30	7,28	14,89	1,06	0,18	3,38
	30,2	61,41	72,30	0,32	4,91	2,49	7,64	2,15	1,68	0,09	2,94
	50,0	57,86	68,53	0,47	5,65	2,99	6,57	4,48	1,91	0,26	2,93
	70,8	63,02	67,52	0,53	1,18	3,73	5,18	9,54	0,11	0,10	2,59
	90,1	25,91	43,88	0,89	1,86	8,73	21,67	4,51	0,15	0,12	7,33
	110,0	18,07	41,03	1,03	1,76	9,82	28,07	2,45	0,08	0,08	9,80
0531	26,0	16,50	38,00	1,04	2,72	9,31	26,20	4,31	0,10	0,18	9,08
	77,8	31,23	49,63	0,49	3,74	4,15	22,09	1,81	0,18	0,09	6,95
	127,0	20,15	40,48	0,85	3,08	7,77	24,51	4,28	0,17	0,20	9,34
0737	35,5	41,43	54,76	1,53	5,84	6,69	13,49	3,31	0,86	0,19	5,23
	86,5	66,69	76,33	0,15	4,89	1,83	7,30	1,01	1,33	0,05	0,01
	134,5	67,07	76,50	0,43	5,33	2,34	6,84	0,86	1,39	0,05	2,22
	185,0	44,46	58,46	1,15	4,61	6,60	13,65	1,97	1,05	0,10	4,54
0437	60,5	32,04	48,63	0,61	3,13	7,61	19,75	3,15	0,21	0,17	7,05
	101,5	40,80	54,79	1,10	4,73	6,88	14,57	3,24	0,78	0,19	5,01
	159,5	27,71	69,15	0,51	4,90	3,13	10,47	1,14	1,25	0,11	1,19
	211,5	19,97	38,31	1,27	2,20	10,89	22,09	6,18	0,16	0,17	7,91
	261,0	12,91	38,42	0,60	2,40	9,42	31,08	2,26	0,12	0,15	10,93
0632	69,9	13,61	37,88	0,80	1,78	9,88	29,69	3,61	0,08	0,16	10,34
	119,2	23,57	42,58	0,63	2,48	7,15	23,02	5,08	0,13	0,19	7,50
	170,4	19,03	40,14	0,71	2,88	7,72	25,37	4,28	0,20	0,21	9,30
0834	75,0	14,17	38,76	0,98	1,79	9,23	30,11	2,96	0,07	0,19	10,87
	96,0	26,87	45,71	0,66	2,75	7,83	22,50	3,87	0,22	0,13	6,68
	134,7	15,87	37,55	0,91	1,91	10,13	26,55	5,09	0,11	0,22	9,18
0335	141,0	15,45	39,05	0,33	3,30	8,18	28,24	3,50	0,26	0,10	16,65
	146,0	51,00	62,72	0,83	4,67	4,89	10,15	3,46	1,25	0,09	11,59
	146,1	52,32	64,03	0,77	4,80	4,28	9,79	3,24	1,35	0,11	11,06
	177,5	28,47	44,61	0,69	3,82	5,16	14,33	9,70	1,62	0,90	19,19
	198,5	17,55	37,89	0,763	3,71	8,72	24,00	4,54	0,32	0,15	19,91
028	260,0	10,09	32,39	1,03	2,17	10,72	26,98	6,18	0,16	0,33	19,91
	260,2	21,36	41,51	0,97	3,92	9,34	17,79	5,14	2,05	1,47	17,30
	264,0	10,60	32,66	1,42	1,82	11,53	26,82	5,71	0,12	0,31	19,73
	280,0	13,33	35,96	0,91	2,50	9,39	27,25	4,36	0,20	0,19	18,90
0635	338,6	10,90	34,91	1,26	2,22	11,34	29,16	5,44	0,14	0,56	14,98
	389	13,38	37,04	0,98	3,17	10,36	28,62	3,82	0,17	0,19	15,69
	369	11,30	35,21	1,17	2,87	12,06	28,48	4,63	0,30	0,38	14,67
	389	21,94	41,29	0,91	2,71	7,92	22,19	3,81	0,49	0,24	19,42
	399	23,07	44,52	0,84	3,95	6,79	19,22	4,01	2,10	0,18	17,41
	439	16,14	37,57	1,10	4,93	10,16	24,97	2,88	0,43	0,34	16,46
	451	13,76	36,59	1,11	3,92	10,61	27,15	3,48	0,30	0,35	15,93

0334	15,0	62,33	73,04	0,41	5,29	2,85	7,48	1,68	1,66	0,08	2,87
	35,0	57,71	69,46	1,01	4,46	6,11	10,32	0,89	1,21	0,06	2,97
	45,0	67,34	76,53	0,52	5,23	3,00	6,33	0,79	1,45	0,06	2,26
	75,0	58,75	69,79	0,32	5,04	3,27	7,34	4,55	1,85	0,18	3,77
	95,0	23,27	38,31	0,81	5,12	6,01	11,27	15,31	2,11	0,85	4,45
	144,0	32,62	50,11	0,54	5,05	6,40	17,90	2,78	1,07	0,22	4,61
	195,0	22,22	40,96	0,31	4,79	6,65	21,89	4,52	0,36	0,12	7,21
	246,2	36,66	53,30	0,70	5,05	5,83	13,84	4,95	1,94	0,33	5,78
	295,2	13,79	36,84	1,23	2,82	11,32	27,63	4,10	0,24	0,34	11,51
0534	345,0	15,64	37,67	1,23	2,80	9,94	26,47	4,44	0,21	0,15	8,32
	395,0	17,90	38,98	1,36	3,47	10,45	25,20	4,89	0,24	0,55	6,87
	120,0	64,76	74,36	0,31	5,43	2,32	5,87	2,77	1,73	0,14	4,30
	139,5	70,43	78,65	0,18	5,02	1,25	4,86	2,46	1,53	0,08	3,70
	159,5	65,52	73,22	0,38	5,01	2,61	4,01	5,30	1,59	0,14	1,54
	180,6	49,32	59,29	0,44	4,52	3,03	7,26	10,11	1,46	0,59	2,69
	199,0	69,55	77,70	0,29	5,30	1,83	4,57	2,52	1,59	0,11	2,01
	219,0	43,14	57,13	1,27	4,69	6,63	13,16	3,18	1,19	0,14	5,31
	238,7	56,34	67,81	0,68	4,51	4,11	9,60	2,36	1,32	0,08	3,15
	261,0	21,43	40,05	0,77	4,04	5,63	19,29	8,47	1,07	0,44	6,88
	280,0	18,84	37,17	1,01	2,80	9,23	22,76	6,89	0,32	0,33	6,86
	290,0	17,49	40,09	0,83	2,66	8,81	27,21	4,65	0,20	0,32	8,23
	300,0	13,11	38,72	0,89	2,35	9,71	30,86	3,02	0,22	0,26	10,88
	320,0	10,61	36,33	0,78	2,59	9,57	30,68	4,80	0,31	0,33	10,49
340,0	10,81	35,18	1,13	2,18	10,71	29,58	5,80	0,16	0,34	10,11	

формируется за счет дополнительного привноса этих элементов грунтовыми водами.

Если грунтовые воды обладали заметной фильтрацией, то метасоматические колонки должны характеризоваться большей мощностью и более резкими переходами между зонами по сравнению со случаями незначительной фильтрации.

Приведенные соображения, по-видимому, и объясняют развитие столь мощных зон вторично измененных пород в африканской трубке.

Накопление глинозема в приповерхностных частях трубки происходило, по-видимому, в результате взаимодействия гидротерм с грунтовыми водами.

Результаты проверки генетических гипотез относительно строения африканской трубки. Анализ петрографических данных показал, что они не содержат однозначных доказательств в пользу признания того, что в кратерной части трубки присутствуют крупные фрагменты осадочных пород. Изучение распределений Q по разрезам скважин выявило их последовательное изменение в пределах как симметричных, так и асимметричных структур типа метасоматической зональности. Все это позволяет считать гипотезу о вторичном гидротермально-вадозном генезисе измененных пород трубки «К» наиболее вероятной.

ВЫВОДЫ

Массоперенос при вторичном изменении кимберлитов эффективно рассматривать на фоне изменения показателя Q — нормативного вторичного кварца. Петрологическим наполнением этого показателя являются процессы гидратации силикатов, главным образом оливина, сопровождающиеся выделением свободной кремнекислоты за счет выноса других компонентов. Относительно слабо измененные кимберлиты трубки Мир ($Q = -3 — +25\%$) и весьма значительно измененные кимберлиты трубки «К» Анголы ($Q = 12–80\%$) образуют единый вариационный ряд, позволяющий наметить основные этапы процесса их постмагматического преобразования.

Наиболее ранним проявлением переноса вещества при вторичных изменениях является вынос калия из глубинных частей и локализация его в приповерхностных частях трубок.

На следующем этапе при формировании окварцованных ($Q > 25\%$) кимберлитов основным петрохимическим трендом является вынос магния и накопление Al_2O_3 .

Показатель Q может использоваться для детализации геологического строения кимберлитовых тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шамшина Э. А. Коры выветривания кимберлитовых пород Якутии / Э. А. Шамшина. — Новосибирск : Наука, 1979. — 150 с.
2. Зинчук Н. Н. Некоторые закономерности распределения вторичных образований в кимберлитах Якутии (на примере трубки Удачная) / Н. Н. Зинчук, Ю. П. Мельник, А. Д. Харьков / Геология и геофизика, 1983. — № 10. — С. 95–101.
3. Зинчук Н. Н. Вторичные минералы кимберлитов трубки Мир и особенности их распространения / Н. Н. Зинчук, Ю. П. Мельник // Изв. вузов. Геология и разведка, 1986. — № 4. — С. 54–62.
4. Зинчук Н. Н. Постмагматические минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук. — Москва : Недра-Бизнес-Центр, 2000. — 538 с.
5. Зинчук Н. Н. Опыт петрохимической типизации пород одной из кимберлитовых трубок Западной Африки / Н. Н. Зинчук, С. Ф. Носыко, В. Б. Василенко, А. Я. Ротман // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. — Воронеж : ВГУ, 2003. — С. 70–74.
6. Василенко В. Б. Изменение вещественного состава кимберлитов на стадии постмагматического кислотного выщелачивания / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, А. Я. Ротман, Л. Г. Кузнецова // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. — Воронеж : ВГУ, 2001. — С. 18–30.
7. Василенко В. Б. Химический состав и алмазонасность кимберлитов трубки Нюрбинская (В. Сибирь) в процессе вторичного изменения / В. Б. Василенко, А. В. Толстов, Л. Г. Кузнецова, В. А. Минин // Геохимия (в печати).
8. Алмазы Сибири / Сост. А. П. Бобриевич, М. Н. Бондаренко, М. А. Гневушев и др. — М. : Госнаучтехиздат, 1957. — 158 с.
9. Алмазные месторождения Якутии / Сост. А. П. Бобриевич, М. Н. Бондаренко, М. А. Гневушев и др. — М. : Госнаучтехиздат, 1959. — 525 с.
10. Соболев В. С. Условия образования месторождений алмазов // Геология и геофизика, 1960. — С. 7–22.
11. Францессон Е. В. Состав и строение кимберлитовой трубки «Мир» / Е. В. Францессон // Петрография и минералогия коренных месторождений алмазов. — М. : Изд-во АН СССР, 1962. — С. 19–38.
12. Боткунов А. И. Некоторые закономерности распределения алмазов в трубке Мир / А. И. Боткунов // Зап. ВМО, 1964. — Ч. ХСШ. — Вып. 4. — С. 424–435.
13. Добрецов Н. Л. Факторы и типы алмазонасных кимберлитовых трубок Якутии / Н. Л. Добрецов, В. В. Зуенко // Геология и геофизика. — 1972. — № 7. — С. 31–39.
14. Шалаев И. К. Структурно-текстурная классификация кимберлитов и особенности строения трубки «Мир» / И. К. Шалаев, В. М. Владимиров // Тр. ИРГИРедмета, 1972. — Вып. 24. — С. 22–31.
15. Зольников Г. В. О содержаниях титана и хрома в компонентах кимберлитовой брекчии / Г. В. Зольников, Н. Д. Филиппов // Магматические образования Северо-Востока Сибирской платформы. — Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1975. — С. 169–177.
16. Петрохимия кимберлитов / А. Д. Харьков, В. В. Зуенко, Н. Н. Зинчук и др. — М. : Наука, 1991. — 304 с.
17. Милашев В. А. Кимберлиты и глубинная геология / В. А. Милашев. — Л. : Недра, 1990. — 167 с.
18. Добрецов Н. Л. Породообразующие пироксены / Н. Л. Добрецов, Ю. П. Кочкин, А. П. Кривенко, В. А. Кутолин. — М. : Наука, 1971. — 454 с.
19. Бетехтин А. Г. Курс минералогии / А. Г. Бетехтин. — М. : Госнаучтехиздат литературы по геологии и охране недр, 1956. — 558 с.
20. Василенко В. Б. Нормативный кварц как Критерий интенсивности массопереноса при постмагматическом и гипергенном изменении кимберлитов трубки Ботубинская / В. Б. Василенко, А. В. Толстов, В. А. Минин, Л. Г. Кузнецова, Н. В. Сурков // Геология и геофизика (в печати).
21. Василенко В. Б. Средние составы кимберлитовых тел Вилуйской субпровинции Якутии как основа для формационной идентификации кимберлитов / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, Л. Г. Кузнецова, В. А. Минин, Л. Д. Холодова // Вестник ВГУ. — Серия: геология. — 2006. — С. 126–140.
22. Vasilenko V. B. Mantle plumes as determining factor of vertical migration of magma generation zones, fixed the bulk kimberlite composition / V. B. Vasilenko, N. N. Zinchuk // Plumes and problems of deep sources of alkaline magmatism. Proceedings of the International Conference. — Khabarovsk, Publishing House of the Irkutsk State Technical University, 2003. — P. 96–114.
23. Brogger W. Die Eruptivgesteine des Kristianiagebietes; IV, Idas Fengebiet in Telemark, Norvegen. Skrifter utg. av Videnskapsselskapet i Kristiania, Oslo, 1921. — Bd 2. — N 9. — P. 77–89.
24. Барт Т. Кольцевой комплекс Фен / Т. Барт, И. Рамберг // Карбонатиты. — М. : Мир, 1969. — С. 234–264.
25. Сергеев А. С. Фениты комплекса ультраосновных и щелочных пород / А. С. Сергеев. — Л. : ЛГУ, 1967. — 163 с.
26. Разумова В. Н. Древние коры выветривания и гидротермальный процесс / В. Н. Разумова. — М. : Наука, 1977. Труды ГИН АН СССР. — Вып. 303. — 156 с.
27. Коржинский Д. С. Очерк метасоматических процессов / Д. С. Коржинский // Основные проблемы в учении о магматических рудных месторождениях. — М. : АН СССР, 1955. — С. 335–456.
28. Гинзбург И. И. Термины и понятия, относящиеся к коре выветривания / И. И. Гинзбург, К. К. Никитина // Обзор геологических понятий и терминов в применении к металлогении. — М. : Изд-во АН СССР, 1963. — С. 151–158.
29. Горная энциклопедия / гл. ред. Е. А. Козловский. — М. : Советская энциклопедия, 1986. — Т. 2. — 575 с.