

ПОВЕДЕНИЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОСТМАГМАТИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ КИМБЕРЛИТОВ

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

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Котляго, 3, Россия*

** АК «АЛРОСА», Ботуобинская ГРЭ, 678170 Мирный, ул. Ленина 44б, Россия*

При серпентинизации и последующем изменении кимберлитов в условиях отсутствия брусита в них накапливается некомпенсированная кремнекислота. Ее количество можно рассчитать, исходя из средних составов породообразующих минералов кимберлитов (оливин, кальцит, флогопит) и химического состава пород. Для 12 кимберлитовых трубок Якутской кимберлитовой провинции в 413 образцах кимберлитов из зон вторичного изменения и неизмененных кимберлитов определены содержания породообразующих оксидов и РЗЭ. В каждой трубке на основании знаний о вторичном кварце строились колонки последовательных изменений кимберлитов. В этих колонках оценивалось поведение породообразующих оксидов и РЗЭ. В результате было установлено, что все изученные породы в той или иной мере подвергнуты постмагматическим гидротермально-метасоматическим изменениям, отмечаемым на разных глубинах всех кимберлитовых трубок. Изменения выражаются в привносе или выносе породообразующих оксидов и РЗЭ. Привнос РЗЭ при вторичном гидротермально-метасоматическом изменении кимберлитов сопровождается увеличением в этих породах TiO_2 , P_2O_5 и CaO. Вынос РЗЭ сопряжен с частичным выносом большинства породообразующих оксидов. Максимальный привнос РЗЭ составляет по сравнению с неизмененными кимберлитами в тр. Удачная-восточная 67 %, в тр. Нюрбинская — 59 %. Максимальный вынос составляет в процентах от неизмененных кимберлитов в тр. Айхал — 87 %, в тр. Интернациональная — 81 %. Во всех изученных примерах постмагматически измененных кимберлитов первичные содержания РЗЭ значительно изменялись. Этот вывод стал возможным благодаря использованию в качестве критерия степени вторичного изменения пород количеств нормативного кварца.

Кимберлит, постмагматических метасоматоз, породообразующие оксиды, РЗЭ, нормативный кварц, привнос—вынос.

BEHAVIOR OF MAJOR AND RARE-EARTH ELEMENTS DURING THE POSTMAGMATIC ALTERATION OF KIMBERLITES

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

During serpentinization and subsequent alteration in the absence of brucite, kimberlites accumulate uncompensated silica. Its amount can be calculated from the average compositions of the rock-forming minerals (olivine, calcite, phlogopite) and the chemical compositions of the rocks. The contents of rock-forming oxides and REE were determined in 12 kimberlite pipes of the Yakutian kimberlite province, in 413 samples from secondary-alteration zones and of unaltered kimberlites. Columns of successive kimberlite alterations were constructed for each pipe on the basis of secondary-quartz data; here, the behavior of rock-forming oxides and REE was assessed. All the studied rocks had experienced different degrees of postmagmatic hydrothermal metasomatism at different depths in all the pipes. The changes were reflected in the supply/loss of rock-forming oxides and REE. During the hydrothermal metasomatism, the supply of REE enriched the kimberlites with TiO_2 , P_2O_5 , and CaO. During the removal of REE, most of the rock-forming oxides were partially lost. The maximum REE supply was 67% in the Udachnaya-Vostochnaya pipe and 59% in the Nyurbinskaya pipe as compared with the unaltered kimberlites. The maximum REE loss was 87% in the Aikhal pipe and 81% in the Internatsional'naya pipe as compared with the unaltered kimberlites. The initial REE contents of postmagmatically altered kimberlites changed considerably in all the studied cases. This conclusion has been drawn owing to the use of normative-quartz content as a criterion for secondary alteration.

Kimberlite, postmagmatic metasomatism, rock-forming oxides, REE, normative quartz, supply and loss

ВВЕДЕНИЕ

Распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в кимберлитах привлекают большое внимание исследователей [Лутц, Францесон, 1976; Илупин и др., 1990; Похиленко и др., 1993; Taylor et al., 1994; Парсаданян и др., 1996; Шимизу и др., 1997; Makhotkin et al., 2000; Богатиков и др., 2001; Василенко и др., 2003, 2005; и др.]. Однако методология использования РЗЭ в кимберлитах при решении петрологических задач содержит ряд нерешенных вопросов. Это, во-первых, контаминация кимберлитов вмещающими

породами, во-вторых, возможные вынос и привнос РЗЭ при постмагматическом метасоматозе и, в-третьих, вторичная доломитизация кимберлитов как следствие фиксации карбонатами выносимой из оливина магнезии.

Следующим методологическим упущением при исследовании РЗЭ в кимберлитах является игнорирование параллельных с РЗЭ содержаний породообразующих оксидов. Особенно обделены в этом отношении коры выветривания. Тем не менее исследование поведения РЗЭ в кимберлитах продолжают, несмотря на отмеченные методические трудности.

Так, В.Б. Бурков [1990] показал, что при выветривании кимберлитов происходит дифференциация лантаноидов. Их первичный состав изменяется в сторону относительного накопления элементов промежуточной группы (Sm-Нo) при существенном снижении доли La и Ce.

Поведение РЗЭ в условиях высоких температур и давлений при эклогитизации рассмотрел В.С. Шацкий [1990]. По его данным, в тех случаях, когда эклогитообразование сопровождалось дегидратацией протолитов, совместно с флюидами из них могли выноситься некоторые количества подвижных элементов, в том числе редкоземельные элементы. Однако, если формирование эклогитов сопровождалось привнесом флюидов, то в этом случае уровень накопления РЗЭ в них мог повыситься.

Задачей настоящего исследования является параллельное сравнение изменения средних групповых содержаний породообразующих оксидов и РЗЭ в кимберлитах с разной степенью вторичного изменения в месторождениях алмаза Якутской провинции.

Критерии интенсивности постмагматических изменений кимберлитов. Выше было отмечено, что помимо постмагматических агентов, первичные содержания РЗЭ могут изменяться в результате коровой контаминации кимберлитов. В этом случае для оценки интенсивности коровой контаминации используется метод К.Р. Клемента [Clement, 1982].

Для якутских кимберлитов, в которых среди вмещающих пород преобладают в основном известняки и эвапориты, этот метод малоэффективен. В нашей работе анализируемые образцы в раздробленном виде тщательно исследовались под бинокулярным микроскопом для удаления всех инородных включений.

Постмагматические изменения кимберлитов нами фиксировались по количеству нормативного вторичного кварца.

Конкретные примеры постмагматических изменений в кимберлитах Якутии детально описаны Э.А. Шамшиной [1979], Н.Н. Зинчуком [2000] и другими. По мнению Д.С. Коржинского [1955], при раскристаллизации кимберлитовых расплавов освобождается значительное количество воды, которое вызывает серпентинизацию вкрапленников оливина и минералов основной массы. Процесс протекает при температурах 500—200°C. Общепринятой точкой зрения является представление о том, что в кимберлитах Якутии процесс серпентинизации проходит с выносом MgO и накоплением SiO₂, т.е. без образования брусита.

Фундаментальным положением в науке о постмагматических изменениях кимберлитов следует признать положения Э.А. Шамшиной о накоплении вторичного кварца пропорционально интенсивности изменения кимберлитов. Знание накопленных объемов нормативного вторичного кварца позволяет классифицировать изучаемый образец кимберлита как неизменный или измененный в определенной степени.

Определенной методической трудностью является выбор статистической модели, на основе которой можно было бы провести сопоставления. В геохимической литературе нет единого мнения о преимуществах использования логнормального закона распределения случайных величин для описания распределений редких и рассеянных элементов.

Проверка гипотез о применимости для эмпирических выборок нормального или логнормального законов распределения [Василенко и др., 1978] не выявила каких-либо предпочтений.

Эмпирические выборки часто оказываются полимодальными, и вычисление мер рассеивания для них лишено смысла. В этом отношении предпочтительно рассеивание оценивать коэффициентами вариации. Во-первых, они в наименьшей мере искажаются в произвольных распределениях случайных величин, а во-вторых, дают представление об отличии эмпирических распределений от нормального закона. Например, «в неслишком маленькой выборке из нормальной генеральной совокупности величина v должна быть не более 33 %» [Закс, 1976, с. 81]. При $v > 33$ % распределение отличается от нормального.

Сокращение влияния случайной компоненты на статистические характеристики совокупностей можно произвести путем подразделения их совокупностей на какие-либо подсовкупности.

Разъясняя закон больших чисел, Гарольд Крамер [1975] в разделе «Статистическая устойчивость» отметил, что «в последовательности случайных экспериментов невозможно предсказывать индивидуальные результаты, так как в этих результатах обнаруживаются неправильные случайные комбинации, не подлежащие точному учету. Однако, как только мы перенесем свое внимание с индивидуальных экспериментов на последовательность экспериментов в целом, положение коренным образом изменится и

обнаружится чрезвычайно важное явление: несмотря на неправильное поведение индивидуальных результатов, средние результаты достаточно длинной последовательности случайных экспериментов обнаруживают поразительную устойчивость» [Крамер, 1975, с. 162]. Настоящая работа методически построена согласно этим рекомендациям. Редкоземельно-петрохимические подсовокупности по каждой трубке подразделены на зоны с разной степенью вторичного изменения пород.

Нормативный вторичный кварц. Во вторично измененных кимберлитах встречаются как явно кристаллические, так и скрытокристаллические разновидности вторичного кварца. Поскольку основными породообразующими минералами в кимберлитах являются оливин, кальцит и флогопит, то при условии выноса MgO легко рассчитать нескомпенсированную кремнекислоту. Избыточное для данного образца количество SiO₂ в измененных кимберлитах может быть вычислено как количество нормативного вторичного кварца (Q) по формуле: $Q = \text{SiO}_2 - 0.81\text{MgO} - 2.8\text{K}_2\text{O}$ [Василенко и др., 2008]. Некоторое ограничение на применение этого уравнения оказывает процесс образования талька, в котором может накапливаться некоторое количество SiO₂. Но в якутских кимберлитах тальк относится к редким минералам, и чаще всего ассоциирует с серпентином. Эффект некоторой задержки в образовании свободной кремнекислоты при выносе магния объясняется тем, что к неизменным кимберлитам мы относим породы с некоторым количеством вторичного кварца.

Опыт использования [Василенко и др., 2008, 2009; Толстов и др., 2009] нормативного кварца в качестве критерия степени изменения пород показал его эффективность.

Важным для понимания значения вторичных процессов в кимберлитах является оценка распределения вторичного кварца в целом по исследованной совокупности составов кимберлитов, состоящей из более 6 000 силикатных анализов образцов кимберлита (рис. 1).

Как видно, на рис. 1 выделяются зоны: I — $Q < 1.00\%$, II — $0.99 > Q > 3.99\%$, III — $4.0 > Q > 11.99\%$, IV — $Q > 12.00\%$.

На практике метасоматическая зональность трубок выявлялась следующим образом: для всей совокупности (N) анализов вычисляется величина показателя Q. Затем для выборки содержаний породообразующих оксидов и РЗЭ в каждой трубке происходило разделение на подвыборки (зоны) по значениям Q. Поведение оксидов и РЗЭ при метасоматозе оценивалось по наличию или отсутствию трендов средних содержаний элементов в подвыборках. Решение о действительном наличии следов метасоматического процесса принималось только для случаев совместного изменения зональных средних Q и MgO. Возникновение зон с отрицательными значениями Q связывается с процессами поглощения кальцитом основной массы высвободившихся ионов магния.

Минералы-концентраторы. Наличие эффективного методического аппарата еще не гарантирует успешного завершения, так как минералы-концентраторы могут консервировать примеси РЗЭ, препятствуя тем самым их миграции в гидротермальных растворах.

Представление о минералах-концентраторах РЗЭ имеет важное значение для построения теоретической модели миграции РЗЭ в гидротермальных условиях и принципиальной оценки реальной возможности явлений переноса РЗЭ.

В кимберлитах РЗЭ обычно концентрируются в обладающих большой изоморфной емкостью аксессуариях — перовскитах, апатитах, ильменитах и гранатах, а также могут входить в структуры флогопита и кальцита. Следует отметить, что флогопиты кимберлитов [Afanasiev et al., 2006] характеризуются довольно низким суммарным содержанием лантаноидов. Хондритовый уровень превышают в 2—3 раза только легкие РЗЭ. Концентрации остальных элементов этой серии ниже, и находятся на уровне обнаружения аналитических методов. Основными минералами-концентраторами РЗЭ в кимберлитах являются перовскит и апатит. Ильменит, гранат, флогопит и кальцит в силу минимальных концентраций РЗЭ не могут оказывать заметного влияния на общий редкоземельный фон породы. Традиционно считается, что большинство аксессуариев, в том числе перовскит и апатит, относятся к минеральным видам, устойчивым к низкотемпературным гидротермальным преобразованиям, что, в свою очередь, предполагает незыблемость редкоземельных параметров породы в целом. Исследования последних лет показывают, что

перовскит в присутствии обогащенного CO₂ флюида становится неустойчивым и превращается в TiO₂ (рутил, анатаз) и кальцит [Chakhmouradian, Mitchell, 2000]. Редкие земли при этом переходят в раствор, образуя комп-

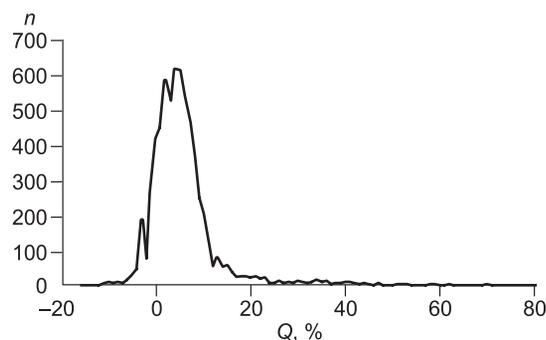


Рис. 1. Распределение содержаний вторичного кварца в кимберлитах трубок:

Ботуобинская, Нюрбинская, Майская, Интернациональная, Мир, Айхал, Юбилейная, Сытыканская, Удачная-западная, Удачная-восточная (N = 6530).

лексные соединения с CO_2 [Haas et al., 1995] и, соответственно, могут либо выноситься из зоны гидротермального преобразования, либо накапливаться в конечных продуктах. По подобному сценарию может развиваться и процесс гидротермального разложения апатита. Факты «освобождения» периферических зон кристаллов апатита от легких редких земель в процессе ретроградного метаморфизма [Corry Stacey, 2006] подтверждают возможность реализации такого механизма.

В пределах обсуждаемого материала у нас есть возможность косвенно оценить минералы-концентраты РЗЭ методом статистических сопоставлений содержаний РЗЭ с содержаниями породообразующих оксидов. В связи с этим сравним средние суммарные содержания РЗЭ в 9 кимберлитовых трубках (исключая трубки Накынского поля) с содержаниями в этих же трубках P_2O_5 , поскольку апатит, обычно, является минералом-концентратом РЗЭ в породных ассоциациях с большим количеством кальцита [Илупин и др., 1974; Василенко и др., 1982; Маршинцев, 1986].

Эмпирическая регрессия типа $\text{РЗЭ} = f(\text{P}_2\text{O}_5)$, построенная по средним содержаниям P_2O_5 и РЗЭ для 9 трубок, показала, что между этими величинами имеет место значимая тесная положительная корреляция (коэффициент корреляции составил 0.90 при критическом значении его для вероятности 99 %, равном 0.83). Эти данные, заметим попутно, говорят о том, что около 20 % варибельности составов РЗЭ связано с возможным вхождением РЗЭ в другие минералы, такие как кальцит, ильменит и другие минералы [Chakmouradian, Mitchell, 1999]. Корреляция РЗЭ с фосфором нами наблюдалась как в неизмененных, так и в разной степени измененных кимберлитах описываемых трубок. В кимберлитах тр. Хризолитовая [Василенко и др., 1982], по данным значений параметров рентгеновской микрокристалличности апатитов, косвенно свидетельствующих о температурах образования этого минерала, встречены 9 образцов, по *PT*-характеристикам соответствующие апатитам в интервале от фосфоритов до высокотемпературных вулканических пород. Исходя из особенностей поведения фосфора на магматической и метасоматической стадиях становления интрузии можно предположить, что содержание примесей оставалось неизменным, только на низкотемпературных этапах гидротерм фосфор может переходить в раствор [Василенко и др., 1982].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленная задача изучения содержаний РЗЭ в зонах пород разной степени изменения на примере 12 кимберлитовых трубок, породы которых охарактеризованы содержаниями породообразующих оксидов и РЗЭ (рис. 2). Это трубки: Ботубобинская (79 анализов), Нюрбинская (48), Майская (20), Айхал (47), Интернациональная (60), Удачная-западная (56), Удачная-восточная (73), Комсомольская-магнитная (10), Поисковая (5), Заполярная (5), Новинка (5), Деймос (5 анализов). Всего в исследовании использовано 413 образцов. Эти образцы характеризуют весь интервал составов алмазоносных кимберлитов. Как известно [Василенко и др., 1997], породы алмазоносных кимберлитов Якутии подразделены на семь ассоциаций, проторасплавы кимберлитовых ассоциаций формировались на последовательно изменяющихся уровнях глубин, от наиболее глубокой 1-й популяции до наименее глубокой 7-й популяции. Как видно из табл. 1, исследованием охвачены породы всех алмазоносных популяций провинции.

Породообразующие элементы определялись рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре VRA-20R, точность их определения удовлетворяет требованиям для ординарного силикатного анализа [Методические основы..., 1979]. Содержания РЗЭ в кимберлитах определялись прецизионным инструментальным нейтронно-активационным анализом [Пархоменко, 1980]. Методика этого анализа позволяет определять La, Nd, Sm, Yb с $\delta < 5\%$, эта ошибка для остальных элементов составляет 15—20 % [Шипицин и др., 1988]. Оба вида анализов проведены в Институте геологии и минералогии СО РАН.

Все использованные данные по содержанию РЗЭ приведены в <http://www.igm.nsc.ru/load/load.html>.

Исследованные образцы отобраны на разных глубинах кимберлитовых тел от 0 до 1450 м. Продукты метасоматических изменений кимберлитов распределены по всей исследованной глубине кимберлитовых тел, что подчеркивает однотипный для глубинных и приповерхностных частей трубок характер процессов постмагматических изменений кимберлитов.

Рис. 2. Схема расположения полей Якутской кимберлитовой провинции.

Поля: 1 — Мирнинское, 2 — Накынное, 3 — Алаakit-Мархинское, 4 — Далдынское, 5 — Верхнемунское.

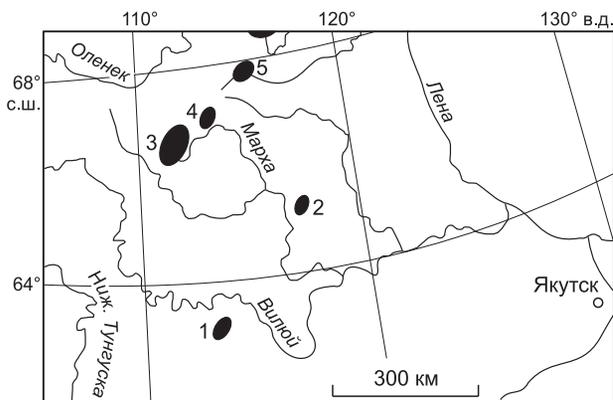


Таблица 1. Относительное количество модальных популяций кимберлитов в изучаемых трубках

Трубка	n*	n ₁ **	Популяции							
			1	2	3	4	5	6	7	
Поисковая	58	5	—	—	—	—	—	—	26	55
Новинка	30	5	—	—	—	39	43	—	—	—
Комсомольская-магнитная	200	10	—	—	—	45	34	—	—	—
Заполярная	345	5	—	—	—	46	31	—	—	—
Удачная-восточная	822	73	—	—	33	47	—	—	—	—
Удачная-западная	1047	56	—	—	67	17	—	—	—	—
Майская	99	20	36	56	—	—	—	—	—	—
Нюрбинская	1035	48	46	45	—	—	—	—	—	—
Айхал	329	47	49	38	—	—	—	—	—	—
Интернациональная	400	60	57	28	—	—	—	—	—	—
Ботуобинская	1001	79	59	31	—	—	—	—	—	—

* n — количество анализов по трубке;

** n₁ — количество анализов с содержаниями РЗЭ.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТИПЫ КИМБЕРЛИТОВ

Анализ современной литературы о распределениях РЗЭ в кимберлитах приводит к выводу, что их содержания колеблются в незначительных пределах. Это положение опровергается полученными нами данными (рис. 3). Распределение значений суммарных содержаний редкоземельных элементов показывает широкие пределы их колебаний от 50 до 1000 г/т. Кривая распределения содержаний РЗЭ характеризуется полимодальностью, что отражает разделение кимберлитов на определенные группы.

По схожести механизмов перемещения породообразующих оксидов, содержанию К₂О в неизменных кимберлитах, разной степени вторичного изменения и разным направлениям движения РЗЭ при гидротермальном метасоматозе выделено 5 геохимических групп трубок (табл. 2). Как следует из этой таблицы, степень вторичного изменения пород и содержания РЗЭ взаимно связаны и положительно коррелируются с содержанием К₂О. Из этой же таблицы следует, что есть геохимические типы трубок с привнесением РЗЭ и выносом их. Кроме того, выделена группа максимально измененных кимберлитов с минимальным содержанием РЗЭ в неизменных кимберлитах. Эта группа будет рассмотрена в конце раздела. Вначале его опишем группы трубок с минимальным выносом РЗЭ. Сюда относятся два геохимических типа трубок Верхне-Мунского поля.

К 1-му геохимическому типу относятся трубки Новинка и Поисковая (табл. 3). К этой же группе относится тр. Деймос, кимберлиты которой полностью сохранены. Примечательно, что в образцах с наибольшими суммами РЗЭ находится наибольшее количество Р₂О₅. Сравнение зональных средних фиксирует привнос кальция и вынос магния и калия.

Ко 2-му геохимическому типу отнесены породы трубок Комсомольская-магнитная и Заполярная (см. табл. 3). Межзональное сравнение средних содержаний указывает на большие масштабы проявления тенденций, намеченных в трубках Новинка и Поисковая: хорошо выраженное накопление Q, сопровождаемое выносом магния. В данной группе трубок более отчетливо проявлен привнос в зону III СаО и вынос К₂О. По петрографическим особенностям кимберлиты этого типа отличаются от кимберлитов алмазных месторождений южной части провинции повышенным содержанием магния и пониженным содержанием кальция. Петрографо-минералогические особенности этих трубок описаны в работах А. Д. Харьквива с соавторами [Петрохимия..., 1991], Н.С. Занкович и Г.Н. Рудаковой [2005], А.С. Фомина с соавторами [1998] и другими. Особенности кимберлитов этого района можно проиллюстрировать на примере трубок Заполярная и Поисковая. По данным Н.С. Занкович и Г.Н. Рудаковой [2005], в тр. Заполярная кимберлиты представлены двумя текстурно-структурными типами — порфировыми кимберлитами и кимберлитовыми брекчиями. В обоих типах кимберлитов отмечаются в значитель-

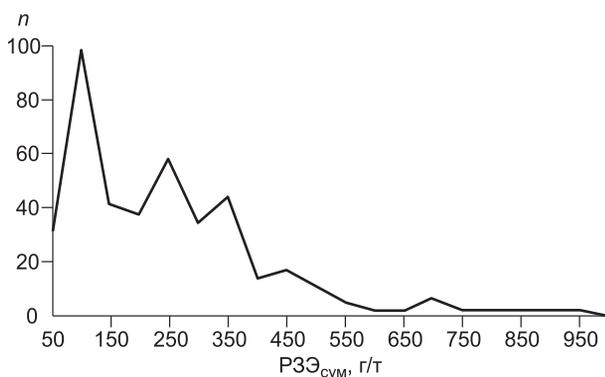


Рис. 3. Распределение 413 суммарных содержаний РЗЭ в кимберлитовых трубках.

Таблица 2.

Средние геохимические показатели для групп трубок

Группа трубок	$\Sigma_{P3Э}$ в разных зонах		$\Delta\Sigma_{P3Э}$	% измененных пород	K_2O , мас. % во II зоне
	II	IV (III)			
Удачная-западная Удачная-восточная	253.0	332.3	+78.4	19.7	0.64
Новинка Поисковая	273.3	255.7	17.0	27.3	0.76
Комсомольская-магнитная Заполярная	278.9	260.6	-18.2	35.2	0.82
Интернациональная Айхал	405.8	107.1	-248.6	39.7	0.89
Ботуобинская Майская Нюрбинская	89.9	71.8	-5.9	80.4	1.45

ных количествах ксенолиты глубинных пород. В основном это гранатовые и гранат-шпинелевые дуныты, гранатовые лерцолиты и гранатовые гарцбургиты. Подавляющее большинство мантийных ксенолитов подвержено серпентинизации.

Содержания РЗЭ в кимберлитах разной степени изменения находятся в прямой связи с изменением содержаний P_2O_5 (рис. 4). Нахождение в пределах одной регрессии кимберлитов разной степени вторичного изменения является следствием незначительного проявления постмагматических изменений кимберлитов.

Группа трубок с привнесом СаО и РЗЭ (3-й геохимический тип). В группу объединены трубки системы Удачная. Система трубок Удачная описана в фундаментальных монографиях Н.Н. Зинчука с соавторами [Петрохимия..., 1991; Зинчук и др., 1993], В.Б. Василенко с соавторами [Василенко и др., 1997] и в других работах. Наличие во внутренних частях этих трубок неизмененных кимберлитов привлекло внимание большого количества исследователей минералогии, геохимии и других особенностей пород [Похиленко и др., 1982; Шацкий и др., 1983; Sobolev et al., 1998; Томиленко и др., 2009]. Однако вопросы изменения состава пород в связи с их редкоземельной минерализацией остаются открытыми.

По представлениям авторов, система трубок Удачная состоит из двух независимых трубок: более ранней и сформированной более глубинными кимберлитовыми проторасплавами — тр. Удачная-западная; и более поздней, сформированной менее глубинными кимберлитовыми проторасплавами — тр. Удачная-восточная.

По соотношению вторичного кварца (судя по генеральным выборкам) наиболее изменена тр. Удачная-восточная (вторичного кварца в породах IV зоны больше в 4 раза, чем в зоне II) (табл. 4). В тр. Удачная-западная перераспределение РЗЭ происходит только в зоне III, где их меньше на 70 %, а в зоне IV столько же, сколько в зоне II, что, возможно, связано с привнесом РЗЭ. Примечательно, что в тр. Удачная-восточная повышение содержаний РЗЭ происходит последовательно от II к III зонам, что фиксирует привнос РЗЭ по мере изменения пород. В тр. Удачная-западная перераспределение РЗЭ происходит только на пути к зоне III, и их меньше на 70 %, а в зоне IV столько, сколько и в зоне II. Возможно, эта особенность возникла в результате привноса РЗЭ совместно с карбонатами. Необходимо отметить, что аналогичная тенденция характерна и для содержаний P_2O_5 . Важной особенностью состава описываемых кимберлитов является привнос K_2O , происходящий параллельно привнесу РЗЭ таким образом, что в зоне наиболее измененных пород высокие содержания РЗЭ ассоциируют с высокими содержаниями K_2O .

Представительные содержания РЗЭ в трубках системы Удачная показаны на рис. 5. Явление

Рис. 4. Фигуративные точки средних значений суммарных содержаний РЗЭ и фосфора в кимберлитах трубок Верхнемунского поля.

Геохимический тип: 1-й (черные кружки), 2-й (светлые кружки); черные треугольники — составы доломитизированных кимберлитов 1-го геохимического типа.

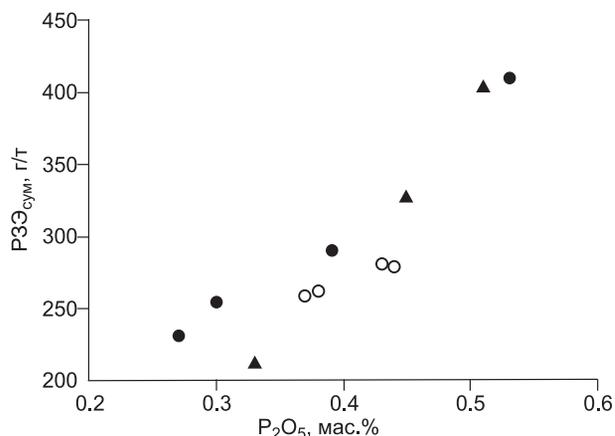


Таблица 3.

Статистики распределений породообразующих оксидов

Компонент	2														
	Новинка						Поисковая						Деймос		
	Генеральные совокупности														
	I		II		III		I		II		III		I		II
	(18)		(98)		(14)		(13)		(26)		(19)		(2)		(3)
	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	x	v
Q, %	-3.37	45	1.70	69	4.70	12	-3.14	92	1.80	78	5.93	19	-3.93	1.78	52
SiO ₂ , мас. %	27.93	8	30.75	6	30.79	11	28.68	7	31.25	4	32.49	4	25.49	28.53	1
TiO ₂	1.44	19	1.42	22	1.44	16	2.22	16	2.25	13	1.99	32	1.48	1.41	21
Al ₂ O ₃	1.94	12	2.18	16	2.31	13	2.06	12	2.25	10	2.15	23	2.44	2.84	12
ΣFe ₂ O ₃	8.62	17	8.66	16	7.29	24	9.42	12	8.88	16	7.89	24	6.95	8.19	11
MgO	35.14	8	32.87	6	31.10	13	36.60	6	34.12	6	31.97	8	33.45	30.16	8
CaO	5.85	50	7.35	38	8.82	54	2.76	50	4.15	62	6.28	55	6.40	11.80	3
K ₂ O	0.76	68	0.87	51	0.33	39	0.78	48	0.65	57	0.24	64	0.83	0.83	52
P ₂ O ₅	0.46	46	0.50	80	0.42	30	0.35	24	0.45	87	0.30	44	0.51	0.53	9

Выборки, содержащие РЗЭ

Компонент	(1)		(3)		(1)	(1)	(3)		(1)	(2)	(3)	
	x	v	x	v	x	x	x	v	x	x	x	v
Q, %	-2.0	32	1.13	32	4.59	-11	1.00	78	6.18	-3.93	1.78	52
SiO ₂ , мас. %	25.14	3	27.92	3	29.04	23.29	31.69	3	30.30	25.49	28.53	1
TiO ₂	1.48	14	1.46	14	1.46	2.04	2.21	6	2.01	1.48	1.41	21
Al ₂ O ₃	2.51	12	2.38	12	2.50	1.51	2.13	1	1.99	2.44	2.84	12
ΣFe ₂ O ₃	7.32	18	7.48	18	8.61	7.79	9.59	3	6.36	6.95	8.19	11
MgO	28.80	4	30.44	4	29.77	41.47	35.28	2	27.88	33.45	30.16	8
CaO	13.72	46	8.78	46	13.08	2.81	2.37	24	11.40	6.40	11.80	3
K ₂ O	1.36	26	0.76	26	0.12	0.33	0.75	34	0.55	0.83	0.83	52
P ₂ O ₅	0.45	19	0.39	19	0.44	0.29	0.30	6	0.27	0.51	0.53	9
La, г/т	95.0	13	85.40	13	87.0	65.0	76.7	5	67.0	11.5	119.0	22
Ce	155.0	14	137.70	14	128.0	10.0	122.7	5	110.0	200.0	195.3	21
Nd	61.0	8	51.90	8	49.0	38.0	44.5	2	43.0	73.5	75.7	14
Sm	8.8	17	7.85	17	7.4	4.7	6.3	4	6.4	11.5	11.8	19
Eu	2.09	15	1.97	15	1.9	1.38	1.64	13	1.1	2.4	2.7	20
Gd	5.20	19	3.99	19	4.6	3.20	3.33	19	3.7	1.4	3.36	30
Tb	0.72	6	0.66	6	0.60	0.41	0.54	8	0.53	0.98	0.92	17
Yb	0.60	31	0.62	31	0.68	0.39	0.50	1	0.6	0.90	0.83	11
Lu	0.01	7	0.01	7	0.01	0.01	0.01	1	0.01	0.01	0.05	105
Σ _{РЗЭ}	328.1	12	290.1	12	279.2	214.1	255.4	13	232.3	405.2	409.8	2

привноса РЗЭ (см. рис. 5, Б) фиксируется фактом попадания вариационной линии измененных кимберлитов в поле неизмененных кимберлитов.

Группа трубок с типичным постсерпентиновым гидротермальным изменением кимберлитов (4-й геохимический тип). В эту группу включены породы трубок Айхал и Интернациональная. Данная группа трубок характеризуется наибольшим выносом РЗЭ. В тр. Айхал встречены аномально высокие содержания РЗЭ, сопряженные с высокими содержаниями P₂O₅ (обр. № 4/728.6; P₂O₅ = 1.58 мас. %; ΣРЗЭ = 1067.7 г/т).

Геохимические особенности трубок этой группы (табл. 5 и 6) состоят в усилении тех тенденций, которые отмечены выше для двух групп кимберлитовых трубок Верхне-Мунского поля. Так в тр. Интернациональная по мере возрастания вторичного кварца убывают содержания MgO. На фоне этого главного геохимического мотива просматриваются менее выраженные тенденции накопления в зонах максимального изменения пород кальция и уменьшения калия.

в 1-м и 2-м геохимических типах трубок

1														
Комсомольская-магнитная							Заполярная							
Генеральные совокупности														
I		II		III		IV	I		II		III		IV	
(8)		(143)		(49)		(2)	(31)		(187)		(144)		(4)	
x	v	x	v	x	v	x	x	v	x	v	x	v	x	v
-2.82	69	1.64	77	6.83	34	15.28	-3.21	65	1.97	67	5.76	24	15.25	4
26.36	9	29.79	10	30.29	12	33.78	27.79	6	30.42	7	31.61	9	28.50	7
1.74	71	1.28	22	1.35	23	2.19	1.23	24	1.31	22	1.31	25	0.90	38
3.81	90	2.55	13	2.75	15	3.24	1.83	22	2.07	31	2.40	55	2.91	92
6.98	36	6.13	17	7.73	25	6.38	7.33	11	7.72	18	7.03	25	7.45	23
28.99	12	30.71	11	27.44	18	20.48	36.86	7	33.50	8	31.00	13	15.76	14
10.29	27	9.11	46	11.30	50	14.50	3.80	67	6.17	56	8.10	56	24.59	18
2.03	65	1.17	41	0.44	68	0.68	0.41	91	0.47	99	0.26	108	0.17	62
0.50	42	0.44	25	0.35	40	0.75	0.42	94	0.40	47	0.38	46	0.58	51
Выборки, содержащие РЗЭ														
—	(7)		(3)		—	—	(3)		(2)		—			
—	x	v	x	v	—	—	x	v	x	—				
—	1.07	102	4.87	10	—	—	2.07	37	4.47	—				
—	27.45	24	30.46	2	—	—	30.46	3	32.22	—				
—	1.24	44	1.07	12	—	—	1.49	16	1.80	—				
—	2.69	8	2.81	7	—	—	2.31	23	2.24	—				
—	7.72	23	6.04	12	—	—	7.96	10	7.06	—				
—	29.04	26	29.14	7	—	—	33.33	4	33.34	—				
—	11.53	88	11.18	12	—	—	6.17	21	6.70	—				
—	1.02	57	0.71	72	—	—	0.50	42	0.27	—				
—	0.43	19	0.37	16	—	—	0.44	34	0.38	—				
—	84.5	40	75.0	13	—	—	79.8	21	77.0	—				
—	130.2	43	121.7	17	—	—	133.7	21	124.5	—				
—	50.4	40	47.7	18	—	—	50.5	20	47.1	—				
—	7.48	37	7.1	14	—	—	7.13	19	6.8	—				
—	2.39	32	1.65	4	—	—	1.82	19	1.71	—				
—	4.42	39	5.03	11	—	—	4.87	10	3.6	—				
—	0.65	36	0.65	17	—	—	0.54	35	0.62	—				
—	0.63	15	0.65	17	—	—	0.52	21	0.50	—				
—	0.01	16	0.01	5	—	—	0.01	16	0.01	—				
—	280.8	40	259.4	14	—	—	278.8	15	261.8	—				

Примечание. Здесь и далее: x — среднее содержание, v — коэффициент вариации $v = (s/x) \cdot 100$, где s — стандартное отклонение. I—IV — зоны, в скобках — количество анализов.

В тр. Айхал при сохранении тенденции накопления вторичного кварца, выноса магния и незначительного накопления кальция в IV зоне появляется новый важнейший для постмагматических процессов тренд выноса калия в зону наибольшего разрушения пород. Этот тренд мы склонны отождествлять с трендом выноса щелочей в интрузии Фен и рассматривать как этап экзоконтактной фенитизации. По-видимому, этот тренд ответствен за наиболее сильный вынос РЗЭ (до 76 % от общего количества суммарных содержаний РЗЭ) в тр. Айхал. Для сравнения напомним, что в других трубках изучаемой ассоциации вынос РЗЭ в значительных количествах фиксируется только в тр. Удачная-восточная, в которой также происходит повышение содержаний калия в наиболее измененной зоне кимберлитов. Представительные содержания РЗЭ показаны на рис. 5, В.

Таблица 4. Статистики распределений породообразующих оксидов в 3-м геохимическом типе трубков

Компо- нент	Удачная-западная								Удачная-восточная							
	Генеральные совокупности															
	I		II		III		IV		I		II		III		IV	
	(40)		(518)		(432)		(24)		(110)		(581)		(122)		(10)	
	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v
Q ₂ , %	-3.24	98	2.35	51	7.18	27	18.95	51	-2.15	78	1.21	105	5.54	29	21.50	38
SiO ₂ , мас. %	19.74	45	25.18	15	26.57	14	30.73	34	24.18	16	25.69	11	27.39	13	34.38	29
TiO ₂	0.86	49	0.89	32	0.80	29	0.73	37	1.12	31	1.17	34	1.09	36	1.11	51
Al ₂ O ₃	2.20	33	2.25	22	2.39	24	3.76	112	2.02	20	2.09	21	2.33	37	6.78	95
ΣFe ₂ O ₃	6.09	48	6.25	35	5.83	33	2.87	60	7.40	25	7.12	24	6.35	30	9.00	106
MgO	23.97	40	25.98	18	23.91	23	9.35	75	29.61	14	28.11	13	24.75	22	10.78	43
CaO	19.56	56	15.23	36	15.70	37	24.28	38	13.79	35	13.45	32	14.89	41	17.57	63
K ₂ O	1.20	64	0.66	55	0.71	66	1.29	101	0.84	56	0.61	53	0.65	77	1.48	59
P ₂ O ₅	0.34	47	0.31	50	0.27	56	0.34	51	0.37	56	0.32	47	0.34	47	0.42	61
Выборки, содержащие P3Э																
Компо- нент	(2)		(43)		(9)		(2)		(11)		(52)		(9)		(1)	
	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	
Q ₂ , %	-1.95		2.38	41	4.52	9	34.18		-1.64	26	1.22	119	6.19	17	15.26	
SiO ₂ , мас. %	4.93		25.09	9	27.47	8	37.14		25.48	10	26.57	8	28.74	94	25.70	
TiO ₂	0.56		0.98	24	0.99	38	0.79		1.36	36	1.22	19	1.16	20	0.99	
Al ₂ O ₃	2.85		2.35	21	2.46	10	2.27		1.96	11	2.02	16	2.33	15	2.51	
ΣFe ₂ O ₃	3.61		5.64	26	6.32	23	1.41		8.45	16	7.13	21	6.56	26	2.92	
MgO	5.50		25.89	8	25.79	11	1.98		30.53	11	29.41	9	25.57	16	7.64	
CaO	44.37		15.60	16	14.19	23	30.26		12.34	45	12.75	23	14.73	30	30.80	
K ₂ O	0.87		0.62	41	0.74	47	0.48		0.86	26	0.62	45	0.66	16	1.52	
P ₂ O ₅	0.25		0.45	51	0.37	21	0.43		0.46	22	0.38	16	0.42	21	0.43	
La, г/т	39.0		76.7	64	45.1	26	80.1		93.8	63	74.2	21	76.3	40	123.0	
Ce	64.0		123.0	66	71.1	29	125.1		145.3	63	116.2	25	118.9	40	196.0	
Nd	22.5		45.3	69	26.4	29	44.4		54.0	65	42.4	26	44.8	39	63.0	
Sm	3.6		7.15	76	4.4	25	6.5		8.3	65	6.43	24	7.29	44	9.5	
Eu	0.78		1.62	84	1.03	22	1.5		2.15	44	1.58	27	1.76	43	2.5	
Gd	2.2		4.86	73	3.6	24	3.6		4.6	40	4.15	23	4.71	30	6.6	
Tb	0.3		0.59	58	0.47	20	0.49		0.62	42	0.53	20	0.60	34	0.82	
Yb	3.3		0.57	37	0.48	9	0.64		0.46	16	0.54	21	0.58	27	0.77	
Lu	0.04		0.07	37	0.06	10	0.08		0.05	12	0.06	26	0.07	24	0.09	
Σ _{P3Э}	132.8		259.8	65	152.5	25	262.3		309.3	62	246.0	24	255.1	48	402.3	

Петрографической особенностью тр. Интернациональная является насыщенность ксенолитами вмещающих пород эвапоритовой формации, что петрохимически фиксируется наличием большого количества аномально высоких содержаний натрия, в предельном случае до 3.86 %. С целью выявления влияния высоких содержаний натрия на содержание P3Э для трех средних значений Na₂O рассчитаны средние содержания P3Э. Для содержаний Na₂O < 1.6 % среднее содержание P3Э составило 304.61 г/т ± ± 33.15. Для содержаний 1.6 % < Na₂O < 2.0 % среднее содержание P3Э составило 259.12 ± 68.88 г/т. Для содержаний Na₂O > 2.0 % среднее содержание P3Э составило 298.17 ± 77.89 г/т. Доверительные интервалы для средних значений вычислялись по формуле: $\Delta x = t \cdot (S/\sqrt{n})$. Как видно из приведенных данных, средние содержания P3Э с разным содержанием натрия значимо не различаются. Отсутствует также тренд изменения средних содержаний P3Э по средним содержаниям Na₂O. Для уточнения полученных результатов между средними содержаниями P3Э и Na₂O вычислен парный коэффициент корреляции. Он оказался незначимым ($r = -0.07$). Таким образом, вывод о том, что натрийсодержащие ксенолиты эвапоритов не влияют на распределение P3Э в исследованной выборке надежно подтвержден статистическими методами.

По ряду технических причин отбор проб на анализы произведен не по случайной схеме — предпочтение отдавалось неизменным породам, поэтому составы кимберлитов разных зон генеральной совокупности несколько отличаются от таковых в выборке с содержаниями P3Э. Это в особенности ка-

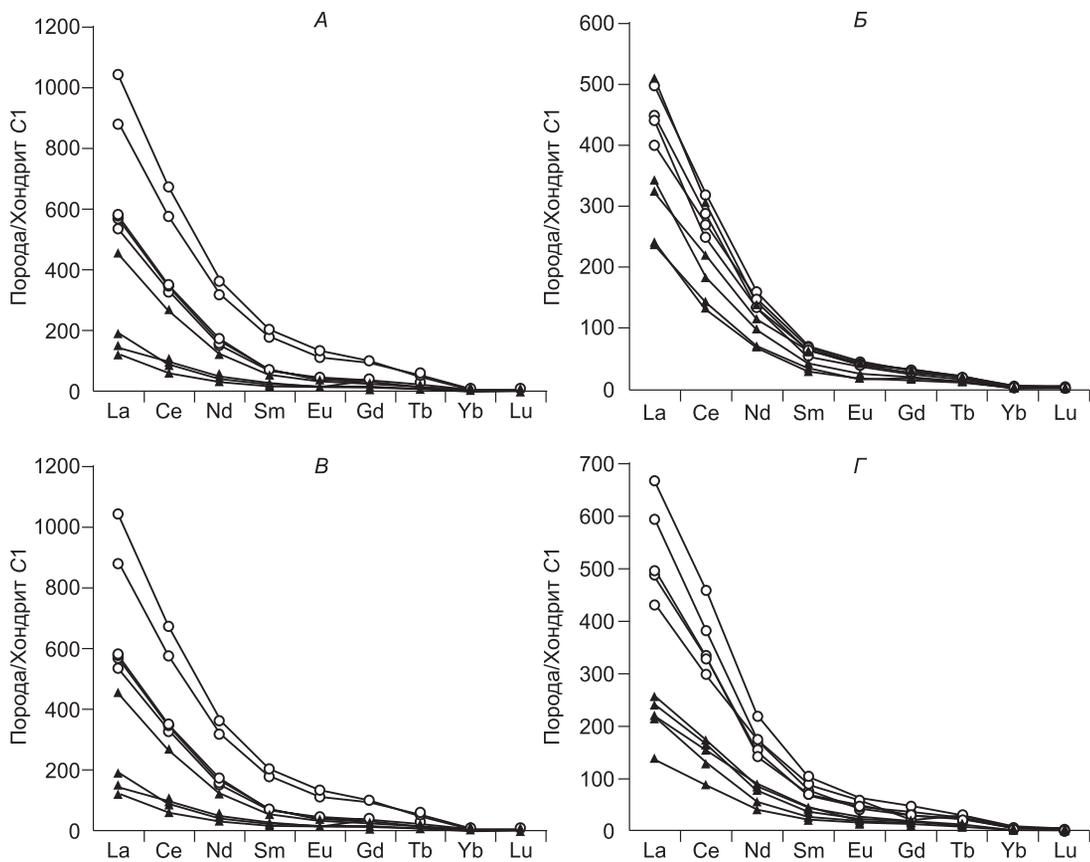


Рис. 5. Распределения содержаний РЗЭ в кимберлитах тр. Удачная-западная (А), Удачная-восточная (Б), Айхал (В), Интернациональная (Г).

Линия с кружками — содержания в неизмененных кимберлитах; черные треугольники — содержания в разной степени измененных породах.

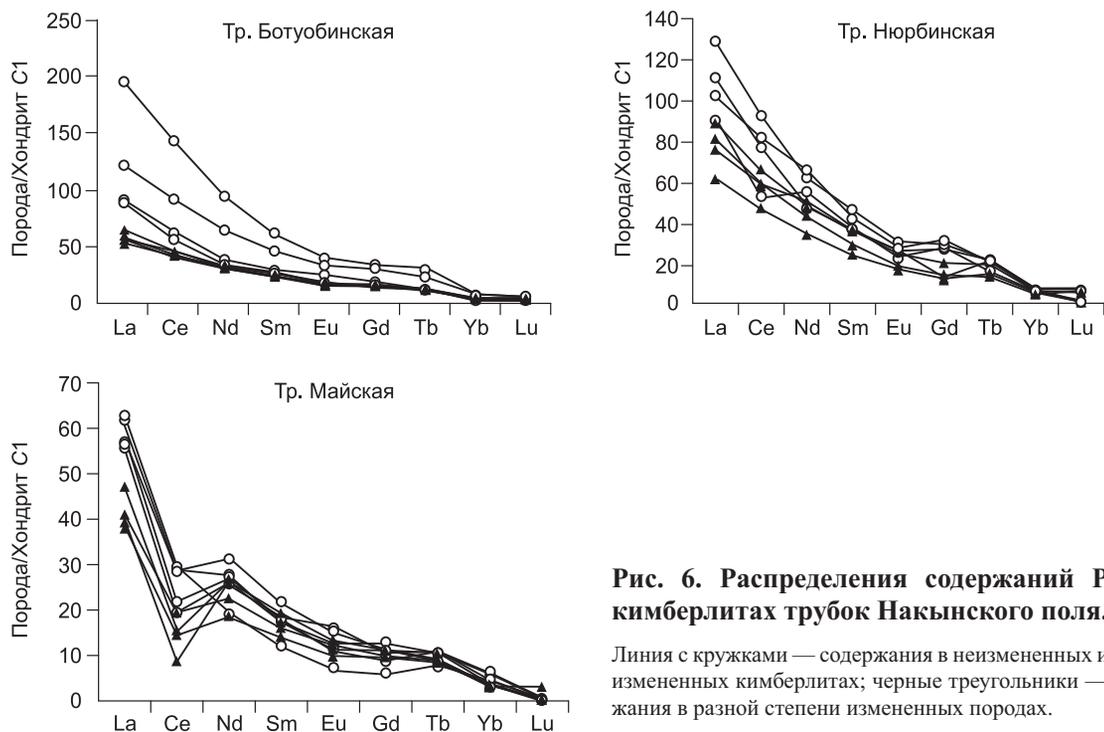


Рис. 6. Распределения содержаний РЗЭ в кимберлитах трубок Накынского поля.

Линия с кружками — содержания в неизмененных и слабо-измененных кимберлитах; черные треугольники — содержания в разной степени измененных породах.

Таблица 5. Статистики распределений пороодообразующих оксидов в 4-м геохимическом типе трубок (гр. Айхал)

Компонент	Генеральная совокупность							
	I		II		III		IV	
	(95)		(136)		(91)		(7)	
	x	v	x	v	x	v	x	v
Q, %	-4.33	67	1.62	90	6.21	32	19.34	33
SiO ₂ , мас. %	18.08	29	23.53	22	26.01	16	36.31	21
TiO ₂	0.42	33	0.43	36	0.43	40	0.32	43
Al ₂ O ₃	2.32	25	2.28	34	2.66	54	4.49	63
ΣFe ₂ O ₃	3.71	31	4.43	30	4.63	29	3.64	52
MgO	23.91	23	24.37	26	21.89	16	15.89	37
CaO	18.97	37	16.34	51	17.55	37	12.92	62
K ₂ O	1.09	52	0.78	64	0.74	84	1.47	63
P ₂ O ₅	0.70	43	0.65	56	0.61	58	0.33	39
Выборка, содержащая РЗЭ								
Компонент	(16)		(20)		(9)		(2)	
	x	v	x	v	x	v	x	
Q, %	-4.11	17	1.57	74	5.45	17	28.27	
SiO ₂ , мас. %	18.47	32	24.75	14	27.53	94	44.21	
TiO ₂	0.43	46	0.45	28	0.51	20	0.24	
Al ₂ O ₃	2.30	32	2.29	17	2.69	15	3.23	
ΣFe ₂ O ₃	4.06	34	5.59	24	4.57	26	2.41	
MgO	24.26	29	25.67	16	24.07	16	15.66	
CaO	18.81	42	15.55	36	15.23	20	11.77	
K ₂ O	1.05	46	0.85	28	0.92	16	1.26	
P ₂ O ₅	0.68	52	0.71	35	0.69	21	0.27	
La, г/т	157.1	57	143.7	37	138.9	58	28.2	
Ce	250.7	54	235.9	35	222.7	56	45.1	
Nd	94.3	53	92.4	34	85.1	56	18.2	
Sm	13.7	36	13.9	35	12.9	43	3.23	
Eu	3.25	9	3.16	32	2.96	30	0.75	
Gd	8.54	24	8.47	31	7.91	34	2.7	
Tb	0.92	3	0.99	28	0.95	20	0.41	
Yb	0.88	2	0.82	13	0.87	16	0.77	
Lu	0.12	—	0.10	25	0.12	13	0.10	
Σ _{РЗЭ}	529.6	54	499.3	31	472.5	53	95.4	

сается наиболее измененных кимберлитов, количество которых в выборке значительно меньше, чем в генеральной совокупности. Поэтому, обсуждая поведение РЗЭ, ограничимся II и III зонами. Этот факт сказывается также в оценке степени вторичного изменения кимберлитов. Данные по выборке свидетельствуют скорее в пользу выводов о нераспространенности вторичных изменений, тогда как данные по генеральной совокупности свидетельствуют об обратном.

Трубка Интернациональная представляет собой типичный пример постагматического изменения кимберлитов с привнесением кремния и железа и выносом магния и кальция. Для трубки характерно последовательное уменьшение содержаний РЗЭ в измененных кимберлитах: на 18 % в III зоне по сравнению с II зоной, и, если принимать во внимание IV зону, то уменьшение достигнет 2.6 раза по сравнению с зоной II (см. табл. 6). Представительные анализы РЗЭ в тр. Интернациональная приведены на рис. 5, Г.

Кривые распределений нормированных РЗЭ неизмененных кимберлитов сосредоточены в областях высоких содержаний La и Ce, а измененных — в областях пониженных содержаний. Кривые 1 и 2 группы не различимы по своей структуре. Измененные кимберлиты отличаются резко пониженным содержанием легких РЗЭ.

Группа трубок Накынского поля (5-й геохимический тип). До мая 2006 г. в Накыском поле были известны две кимберлитовые трубки (Ботубинская и Нюрбинская) и серия даечных тел, наиболее крупное из которых — Мархинское. Открытая в 1996 г. тр. Нюрбинская имеет типичную трубчатую форму и отрабатывается карьером. В мае 2006 г. в пределах ореола одной из промышленных россыпей алмазов было выявлено новое дайкообразное тело, получившее название — Майское.

Таблица 6. Статистики распределений порообразующих оксидов в 4-м геохимическом типе трубок (гр. Интернациональная)

Компонент	Генеральная совокупность							
	I		II		III		IV	
	(17)		(239)		(65)		(79)	
	x	v	x	v	x	v	x	v
Q, %	-2.96	66	1.45	84	6.26	32	18.73	16
SiO ₂ , мас. %	23.38	7	29.03	11	32.36	8	39.56	10
TiO ₂	0.50	37	0.42	37	0.43	34	0.41	48
Al ₂ O ₃	2.54	121	2.40	35	2.82	38	3.95	30
ΣFe ₂ O ₃	5.32	28	6.02	26	6.89	24	5.58	12
MgO	30.43	8	30.64	9	28.59	18	22.71	15
CaO	8.94	31	6.52	54	7.40	53	9.16	45
Na ₂ O	2.27	53	1.57	55	0.64	54	0.34	42
K ₂ O	0.61	47	0.99	51	0.97	56	0.87	46
P ₂ O ₅	0.55	35	0.42	32	0.41	45	0.31	41
Компонент	Выборка, содержащая РЗЭ							
	—		(45)		(14)		(1)	
	—		x	v	x	v	x	
	—		x	v	x	v	x	
Q, %	—	1.19	96	5.78	24	19.72		
SiO ₂ , мас. %	—	29.30	7	32.59	6	43.55		
TiO ₂	—	0.43	17	0.42	11	0.23		
Al ₂ O ₃	—	2.35	28	2.68	23	2.87		
ΣFe ₂ O ₃	—	6.01	23	5.69	15	5.72		
MgO	—	31.42	6	29.29	8	26.31		
CaO	—	6.39	31	7.66	44	5.65		
Na ₂ O	—	1.17	54	0.73	45	0.01		
K ₂ O	—	0.95	45	1.10	32	0.90		
P ₂ O ₅	—	0.47	25	0.42	21	0.22		
La, г/т	—	86.6	26	74.2	20	34.0		
Ce	—	151.8	26	127.9	21	57.0		
Nd	—	55.4	26	46.6	22	20.0		
Sm	—	10.32	37	7.43	23	3.42		
Eu	—	2.14	24	1.74	28	0.88		
Gd	—	4.68	35	4.24	18	2.50		
Tb	—	0.67	22	0.52	17	0.34		
Yb	—	0.64	23	0.64	18	0.59		
Lu	—	0.06	51	0.09	25	0.07		
Σ _{РЗЭ}	—	312.2	26	263.4	8	118.8		

Кимберлиты Накынского поля — наиболее измененные вторичными процессами. Особенности поведения порообразующих элементов и РЗЭ показаны в табл. 7 и рис. 6. В тр. Майская привлекает внимание цериевый минимум на кривых распределения нормированных значений РЗЭ измененных и неизмененных кимберлитов.

В целом накынские кимберлиты характеризуются высокой алмазоносностью при низком содержании пиропов и хромшпинелидов и при отсутствии типичного для кимберлитов Якутии пикроильменита. Детальное петрографическое, минералогическое и петрохимическое описание трубок дано в работах [Василенко и др., 2008, 2009; Толстов и др., 2009].

Особенности перераспределения РЗЭ в щелочных кимберлитах выявляются при анализе рис. 7, на котором видно, что РЗЭ мигрируют совместно с TiO₂ и P₂O₅ точно так же, как и в магматическом процессе [Василенко и др., 2007].

Гидротермальный перенос РЗЭ имеет место в каждой трубке щелочных кимберлитов. Если в трубках Ботубинская и Майская наблюдается вынос РЗЭ, то в тр. Нюрбинская — привнос РЗЭ. Вынос РЗЭ в тр. Майская сопровождается выносом из породы кальция, щелочей, компенсируемым привносом железа, фосфора и магния.

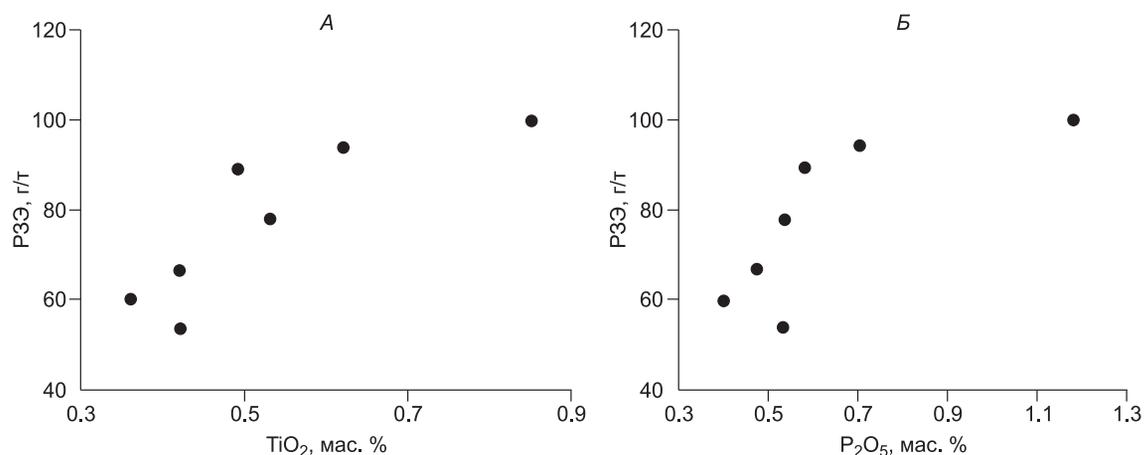


Рис. 7. Фигуративные точки средних значений суммарных содержаний РЗЭ и TiO₂ (А) и P₂O₅ (Б) в разной степени измененных породах Накынского поля.

В тр. Ботуобинская вторичные процессы проявлены в значительной степени. Содержание кварца в генеральной выборке возрастает до 96 %. Количество РЗЭ уменьшается на 98 %. Аналогичные масштабы выноса характерны и для тр. Майская.

Трубка Нюрбинская отличается привнесом РЗЭ, а также суммарного железа, алюминия, фосфора на фоне выноса кальция, магния и калия. Развитие зон интенсивного метасоматоза, возможно, вызванного более молодым долеритовым силлом, описано Д.А. Будаевым [2005]. Этот исследователь проследил контакт кимберлитов с долеритами более чем на 100 м по глубине. Он установил, что сам контакт чрезвычайно обогащен вторичным кварцем. Зона метасоматического изменения кимберлитов, в свою очередь, обогащена целым набором редких и рассеянных элементов. Эти данные позволяют считать, что отмечаемый привнос РЗЭ в тр. Нюрбинская обусловлен влиянием более молодых долеритов.

Трубка Нюрбинская, как и тр. Ботуобинская, отличается привнесом в зону максимального разрушения породы K₂O, а тр. Майская — выносом.

В целом следует отметить, что в рассмотренных трубках имеет место как вынос, так и привнос РЗЭ в связи с накоплением вторичного кварца в результате действия двух процессов: постмагматического выноса РЗЭ при автосоматическом изменении кимберлитов и привноса РЗЭ при воздействии на кимберлиты долеритов и вторичной мобилизации кимберлитовых гидротермальных растворов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Геохимические типы трубок. В последовательностях зон измененных кимберлитов зона I отнесена к так называемым доломитизированным породам с отрицательными значениями Q. По нашему мнению, -Q появляется с началом серпентинизации и высвобождением магния, который частично может входить в решетку кальцита, образуя доломит. В других случаях, при сильной карбонатизации появляется дополнительный карбонат, уменьшающий долю кремнекислоты, возможно, с выносом некоторых компонентов. В трубках Верхне-Мунского поля, тр. Айхал и трубках Накынского поля -Q возникает в результате карбонатизации, активно проявленной в процессе всех стадий изменения пород. Чтобы не путать начальную карбонатизацию с последующей низкотемпературной, мы оставляем за всеми породами с -Q термин «доломитизация». Вполне резонен вопрос о попадании в число доломитизированных пород неизменных кимберлитов. Неизменные породы хорошо различаются по тесной корреляции между MgO и CaO. Для кимберлитов эта связь является типохимической и любое отклонение от нее то ли в сторону кремнекислоты, то ли в сторону магнезии определяется как вторичное изменение. Другой причиной, определяющей отделение доломитизированных пород от вторично измененных, является неучастие их в соответствующих трендах изменения средних зональных содержаний при постмагматических изменениях. Средние содержания доломитизированных пород обычно в отношении наиболее важных элементов то выше, то ниже средних содержаний неизменных кимберлитов. Такие случаи имеют место в тр. Ботуобинская по содержаниям титана, Айхал — по содержаниям CaO и т.д. То же можно наблюдать и в отношении РЗЭ.

Таким образом, зона доломитизированных пород — это зона кимберлитов, измененных на первых стадиях гидротермально-метасоматического процесса. Фактически их составы остаются вне поля настоящего исследования.

Таблица 7. Статистики распределений порообразующих оксидов в 5-м геохимическом типе трубок (трубки Накынского поля)

Компо- нент	Ботуобинская								Нюрбинская								Майская					
	Генеральная совокупность								Генеральная совокупность								Генеральная совокупность					
	I		II		III		IV		I		II		III		IV		II		III		IV	
	(26)		(108)		(831)		(36)		(68)		(146)		(589)		(282)		(7)		(78)		(14)	
	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v
Q, %	-3.69	66	2.29	43	7.25	25	36.16	57	-3.17	54	2.08	60	7.20	26	30.19	48	1.85	93	8.28	22	21.92	53
SiO ₂ , мас. %	14.85	80	26.63	22	30.13	12	47.49	34	15.60	22	22.68	20	29.62	14	45.12	25	20.00	13	28.57	17	36.69	28
TiO ₂	0.32	41	0.51	31	0.40	33	0.69	50	0.41	29	0.43	48	0.44	32	0.90	89	0.35	31	0.41	23	0.42	55
Al ₂ O ₃	3.53	37	3.39	24	3.65	21	9.70	59	3.62	14	3.77	26	3.78	17	8.81	62	4.05	20	3.98	29	6.45	63
ΣFe ₂ O ₃	3.88	40	5.69	59	5.29	21	7.14	69	4.23	22	4.95	35	6.07	24	8.87	53	2.33	30	5.34	38	6.66	83
MgO	17.73	21	25.68	30	24.14	22	7.59	104	18.71	15	21.33	21	24.41	21	14.05	52	15.42	18	20.94	31	13.33	55
CaO	22.92	20	13.87	59	14.00	37	9.59	112	22.17	19	17.74	31	13.16	43	6.85	87	22.91	21	16.51	40	13.52	63
K ₂ O	1.59	48	1.16	43	1.19	44	1.85	81	1.29	46	1.19	74	0.95	69	1.27	97	2.02	25	1.19	72	1.46	82
P ₂ O ₅	0.38	30	0.54	30	0.44	20	0.24	91	0.51	32	0.20	44	0.46	38	0.39	48	0.48	13	0.50	22	0.36	49
Выборки, содержащие РЗЭ								Выборки, содержащие РЗЭ								Выборки, содержащие РЗЭ						
Компо- нент	(1)		(8)		(70)		—		(1)		(21)		(23)		(3)		(1)		(16)		(3)	
	x	v	x	v	x	v	—		x	x	v	x	v	x	v	x	x	v	x	v	x	v
Q, %	-1.55	2.87	32	6.69	27	—		-5.59	1.44	64	5.85	18	29.27	31	3.91	7.64	21	18.55	13			
SiO ₂ , мас. %	26.28	28.16	76	31.13	9	—		12.33	21.38	18	25.73	20	42.47	13	22.67	28.32	18	36.25	13			
TiO ₂	0.45	0.62	18	0.42	34	—		0.30	0.46	28	0.55	26	1.09	55	0.36	0.42	27	0.56	26			
Al ₂ O ₃	3.11	3.44	11	3.35	15	—		2.73	3.63	13	3.66	19	8.41	49	4.74	3.74	17	4.91	51			
ΣFe ₂ O ₃	4.26	6.49	12	5.53	17	—		3.65	4.71	23	6.12	30	11.61	56	2.44	5.49	34	8.05	24			
MgO	27.54	25.93	19	26.14	17	—		19.29	20.20	23	20.77	32	14.51	29	16.11	22.37	26	21.24	25			
CaO	12.68	13.19	15	12.60	36	—		24.09	19.66	27	18.18	70	5.10	72	20.96	16.35	41	11.54	32			
K ₂ O	1.97	1.53	22	1.17	39	—		0.82	1.28	34	1.09	37	0.52	35	2.04	0.91	73	0.18	27			
P ₂ O ₅	0.50	0.70	20	0.47	28	—		0.56	0.56	34	0.66	34	1.58	41	0.40	0.53	20	0.61	1			
La, г/т	12.6	20.2	59	14.2	43	—		12.9	20.44	23	18.0	43	30.1	42	12.9	16.1	21	11.0	16			
Ce	28.9	40.4	55	28.3	40	—		24.2	39.75	26	34.56	41	47.0	45	26.0	22.5	14	18.8	12			
Nd	18.4	21.4	49	14.9	84	—		12.4	19.80	30	17.95	39	29.5	30	13.3	12.7	24	12.9	2			
Sm	4.56	5.0	425	3.99	41	—		2.8	4.74	29	4.11	31	5.45	26	2.7	2.81	24	3.03	11			
Eu	0.86	1.35	40	0.93	37	—		0.70	1.20	28	1.06	25	1.41	28	0.73	0.75	28	0.78	13			
Gd	3.53	4.10	32	3.96	36	—		2.40	3.32	42	3.46	34	4.25	33	2.7	2.18	28	2.13	18			
Tb	0.53	0.59	43	0.42	21	—		0.36	0.58	29	0.54	21	0.63	20	0.39	0.37	16	0.37	11			
Yb	0.78	0.77	24	0.68	20	—		0.58	0.83	22	0.81	13	1.30	15	1.0	0.70	21	0.57	4			
Lu	0.10	0.11	37	0.09	42	—		0.01	0.07	113	0.09	15	0.02	18	0.01	0.01	116	0.01	9			
Σ _{РЗЭ}	70.26	93.92	54	66.48	62	—		56.35	89.29	27	77.89	35	99.59	34	59.73	53.75	45	49.06	8			

Источники углекислоты. Основным источником CaO в метасоматических растворах является расплав собственно кимберлитов, который не может на 100 % состоять из CaO. Нам представляется наиболее вероятной модель поведения карбоната кальция по [Dalton, Wood, 1993], которые показали, что при падении давления расплавы карбонатизированных лерцолитов взаимодействуют с вмещающими перидотитами дунит-гарцбургитового состава таким образом, что в них уменьшаются содержания железа и магния и увеличиваются содержания кальция. Исследование фазовых отношений в системе Al₂O₃—SiO₂—CaO—Na₂O позволило авторам [Wyllie, Lee, 1998] прийти к выводу о том, что карбонатные расплавы, полученные из богатых CO₂ первичных мантийных магм, при коровых давлениях содержат максимум 80 % CaCO₃. Содержание CaCO₃ больше 80 % возникли, по-видимому, за счет карбонатного метасоматоза.

При внедрении кимберлитовых расплавов избыточная газовая фаза обгоняет основной массив карбонатно-силикатного состава и участвует в формировании эксплозивных процессов и в метасомати-

Таблица 8.

**Приведенные коэффициенты вариации для средних содержаний СаО
на разных глубинах кимберлитовых трубок ($V' = (1 + 1/4 n)V$)**

Трубка	Кол-во анализов	Интервал, м	x_{CaO} мас. %	V'	Трубка	Кол-во анализов	Интервал, м	x_{CaO} мас. %	V'
Айхал	93	0—300	16.03	10.4	Удачная-восточная	547	0—300	13.10	41.3
	110	300—600	16.00	10.8		94	300—600	14.54	6.8
	57	600—900	14.80	4.6		63	600—900	16.22	11.6
	4	> 900	17.10	0.36		119	> 900	14.82	10.3
Интернациональная	234	0—300	6.83	28.0	Ботуобинская	402	0—300	16.26	48.5
	62	300—600	8.33	8.1		561	300—600	12.45	43.7
	72	600—900	7.99	12.2		36	600—900	14.72	3.7
	36	> 900	7.17	4.9					
Удачная-западная	398	0—300	14.44	43.9	Нюрбинская	587	0—300	12.70	73.9
	133	300—600	14.56	6.8		119	300—600	12.32	15.7
	97	600—900	19.99	11.6		22	600—900	12.27	3.5
	86	> 900	24.22	10.3					

ческом изменении ранее образованных пород. В результате этого явления средние содержания и дисперсия содержаний СаО возрастают в приповерхностных горизонтах (табл. 8).

При этом примечательно, что количество газовой фазы (количество автолитовых кимберлитов) уменьшается при формировании последних фаз внедрения (табл. 9).

Автолитовые кимберлиты в большей степени содержат углекислоту и именно с этим связано резкое уменьшение в них содержаний РЗЭ. Распространение автолитовых кимберлитов сопряжено с распространением содержаний ксенолитов вмещающих пород, что позволяет предложить гипотезу, согласно которой автолитовые кимберлиты сформировались в результате вязкостной дифференциации расплавов порфировых кимберлитов [Василенко и др., 2000а]. Если это так, то расплавы автолитовых кимберлитовых брекчий должны были отличаться большей вязкостью, нежели расплавы порфировых пород. Действительно, некоторые исследователи [Фомин и др., 1998] отмечали высокомагнезиальный характер автолитовых брекчий. Несколько ранее другие авторы [Никишов, Алтухова, 1978] считали автолитовые кимберлитовые брекчий более карбонатными, связывая их возникновение с начальным этапом гидротермально-пневматолитового процесса. Сравнение химических составов порфировых кимберлитов и автолитовых кимберлитовых брекчий по образцам из трубок Айхал и Удачная показало, что в подавляющем большинстве случаев порфировые кимберлиты обогащены титаном, железом и кальцием. Автолитовые кимберлитовые брекчий обогащены кремнекислотой и летучими. При попадании ксенолитов предыдущих фаз внедрения и вмещающих пород происходит повышение эффективной вязкости расплава, что инициирует мозаичную кристаллизацию обогащенного ксенолитами объема расплава с накоплением в остаточной жидкости карбонатной компоненты. Завершение этого процесса в результате нескольких дискретных стадий кристаллизации приводит к фракционированию из системы некоторого количества карбонатной компоненты, возможно, уже на постмагматической стадии. Обогащение расплава ксенолитами горных пород способствует выделению углекислоты, проникающей в верхние горизонты интрузии. Обычно на этот источник углекислоты внимание не обращают. До сих пор обсуждались внутренние ресурсы поднимающейся кимберлитовой магмы для проведения карбонатизации вмещающих пород. Однако кроме внутренних ресурсов данной интрузии следует учитывать следующие за ней фазы внедрения, а также возможности дотрубочных, внутритрубочных и послетрубочных жил [Василенко и др., 2000б].

Накынское поле. Выше было отмечено отличие в содержаниях РЗЭ трубок Накынского поля от других изученных кимберлитов. По существу стоит вопрос о том, что кимберлиты Накынского поля, сильно обедненные РЗЭ, следует относить к другому генетическому типу, нежели кимберлиты изученных трубок. Наши исследования показали, что для подобных представлений нет обоснований. Пониженные содержания РЗЭ в трубках Накынского поля являются следствием глубокой проработки пород гидротермальными растворами и весьма значительного выноса РЗЭ из кимберлитов. Об этом свидетельствуют наличие значимых корреляций между K_2O и РЗЭ, а также между суммами вторичного кварца в выветрелых кимберлитах (степень изменения пород) и содержаниями РЗЭ в неизмененных породах.

По средним параметрам для геохимических групп трубок (см. табл. 1) можно заключить, что главным аргументом в выветривании кимберлитов является содержание в них K_2O . С увеличением содержания K_2O увеличиваются содержания РЗЭ; также увеличивается распространенность (количество проб измененных кимберлитов) процессов постмагматического изменения и вынос или привнос РЗЭ. Ни одна

Соотношение разных структурных типов кимберлитов в трубках

Параметр	Айхал						Удачная-западная						Удачная-восточная						
	1	1a	2	2a	3	3a	3b	4	4a	4b	4c	3	3a	3b	3c	4	4a	4b	4c
Фаза внедрения	1	1a	2	2a	3	3a	3b	4	4a	4b	4c	3	3a	3b	3c	4	4a	4b	4c
* Популяция, разнородность	1.6	1.8	2.6	2.8	3.6	3.7	3.8	4.1	4.8	4.8	4.8	3.7	3.8	3.8	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9
Кол-во анализов	35	55	23	53	20	21	7	6	12	12	12	42	29	40	40	56	14	14	14
Структурный тип	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ	АКБ
Относительный %	83	17	83	17	75	25	67	33	17	83	17	88	12	30	40	60	32	68	7

Примечание. АКБ — автолитовые кимберлитовые брекчи, ПК — порфиновый кимберлит.
* Формула состава в популяционной модели [Василенко и др., 2001].

из изученных трубок при достаточном количестве наблюдений не осталась незатронутой вторичными изменениями. В распределении содержаний РЗЭ большую роль играет фосфор.

Применимость нормальной модели. В процессе решения главной задачи настоящего исследования — проверка гипотез о перемещении РЗЭ совместно с выносимыми компонентами при гидротермальном изменении пород — использовались разнообразные выборки содержаний породообразующих оксидов. Средние составы и коэффициенты вариации этих выборок приведены в разных разделах настоящей работы. На предмет соответствия нормальному закону распределений породообразующих оксидов исследовано 64 выборки, на составление которых использовано 5925 анализов на 9 породообразующих оксидов. Первичный материал может быть доступен в Интернете (адрес см. выше). Этот материал дал возможность оценить распространенность в выборках коэффициентов вариации с $v > 33\%$. Полученные результаты иллюстрируют следующий ряд: в выборках SiO_2 встречено 10 % с $v > 33\%$; в выборках TiO_2 — встречены в 30 % случаев; Al_2O_3 — 25 % случаев; Fe_2O_3 — 15 %; MgO — 13 %; CaO — 65 %; K_2O — 73 %; P_2O_5 — 75 % случаев. Приведенные результаты свидетельствуют против универсального применения модели нормального распределения.

Распределения редкоземельных элементов на применимость модели нормального распределения для описания эмпирических совокупностей исследованы в 19 выборках, в которых использовано 373 определения РЗЭ. В результате был получен ряд значений коэффициентов вариации: La с $v > 33\%$ встречен в 53 % случаях; аналогично Ce — в 74 %; Ng — 53 %; Sm — 48 %; Eu — 32 %; Gd — 48 %; Tb — 26 %; Yb — 5 %; Lu — 32 %; сумма РЗЭ — 79 % случаев. Как видно из приведенного материала, нормальная модель не может применяться для описания эмпирических распределений.

Постоянно требуемые оценки дисперсий при описании эмпирических распределений являются излишней информацией, так как они не могут быть использованы для научного анализа эмпирических совокупностей.

Общие замечания. Как показали проведенные исследования, во всех эмпирических выборках, сформированных случайным образом, отмечается перемещение массы РЗЭ в гидротермальных растворах. Перенос установлен во всех изученных трубках. Эмпирически намечается такая закономерность: кимберлиты с большими содержаниями K_2O обогащены РЗЭ, но эти же породы подвергаются наиболее интенсивному постмагматическому изменению. Если считать, что хотя бы часть щелочных растворов имеет прототермальное происхождение, то становится понятной интенсивность вторичных процессов в этих кимберлитах. Щелочные кимберлиты — наиболее глубинные образования. Именно они более насыщены летучими, из которых главную роль играют углекислота и вода.

ВЫВОДЫ

Кимберлиты изученных трубок подвержены вторичным изменениям. Их интенсивность коррелируется со щелочностью кимберлитов. С ней же коррелируется содержание в породах РЗЭ. Все РЗЭ могут выноситься и привносятся в кимберлиты. Агенты постмагматических изменений являются частью магматической системы кимберлитов. Проведение любых сопоставлений на основе РЗЭ требует доказательств их первичной природы.

ЛИТЕРАТУРА

Богатиков О.А., Кононова В.А., Первов В.А., Журавлев Д.З. Источники, геодинамическая обстановка образования и перспективы алмазоносности кимберлитов северной окраины Русской плиты: Se-Nd изотопия и ICP-MS геохимия // Петрология, 2001, т. 9, № 3, с. 227—241.

Будаев Д.А. Геохимия кимберлитовых трубок Накынского поля (Якутии) // Геология алмазов — настоящее и будущее. Воронеж, ВГУ, 2005, с. 752—761.

Бурков В.Б. Геохимия некоторых редких элементов в коре выветривания кимберлитов // Геохимические методы поисков неметаллических полезных ископаемых, М., 1990, с. 16—21.

Василенко В.Б., Кривошук Л.М., Пономарева Л.Г., Холодова Л.Д. Микрокристалличность как критерий оценки условий образования апатита Селигдарского месторождения // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1978, с. 356—363.

Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Холодова Л.Д. Апатитовые породы Селигдара. Новосибирск, Наука, 1982, 215 с.

Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г. Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. Новосибирск, Наука, 1997, 574 с.

Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г. Автолитовые кимберлиты как продукт вязкостной дифференциации кимберлитовых расплавов в диаграмах // Петрология, 2000а, т. 8, № 5, с. 586—595.

Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г. К петрологии дотрубочных кимберлитовых карбонатов Якутии // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Сыктывкар, Геопринт, 2000б, с. 28—31.

Василенко В.Б., Леснов Ф.П., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г. О сопряженности распределений редкоземельных элементов и породообразующих оксидов в породах кимберлитовой формации // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж, ВГУ, 2003, с. 38—42.

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., Минин В.А., Кузнецова Л.Г., Гейко Ю.В., Зинчук Н.Н. О корреляции содержания редкоземельных элементов с содержаниями породообразующих оксидов в кимберлитах разных провинций // Вестник ВГУ. Серия геология, 2007, № 2, с. 127—140.

Василенко В.Б., Толстов А.В., Минин В.А., Кузнецова Л.Г., Сурков Н.В. Нормативный кварц как критерий интенсивности массопереноса при постмагматическом изменении кимберлитов трубки Ботубинская (Якутия) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (12), с. 1189—1204.

Василенко В.Б., Толстов А.В., Кузнецова Л.Г., Минин В.А. Химический состав и алмазоносность кимберлитов трубки Нюрбинская (В. Сибирь) в процессе вторичного изменения // Геохимия, 2009, № 11, с. 1075—1081.

Закс Л. Статистическое оценивание. Пер. с немецкого. М., Статистики, 1976, 598 с.

Занкович Н.С., Рудакова Г.Н. Новые данные по петрографии кимберлитов трубок Верхне-Мунского поля (Якутия) // Геология алмазов — настоящее и будущее. Воронеж, ВГУ, 2005, с. 785—789.

Зинчук Н.Н. Постмагматические минералы кимберлитов. М., Недра-Бизнес-Центр, 2000, 538 с.

Зинчук Н.Н., Специус З.В., Зуенко В.В., Зуев В.М. Кимберлитовая трубка Удачная. Новосибирск, НГУ, 1993, с. 128.

Илупин И.П., Варшал Г.М., Павлуцкая В.И., Каленчук Г.Е. Редкоземельные элементы в кимберлитах Якутии // Геохимия, 1974, № 1, с. 126—131.

Илупин И.П., Ваганов В.И., Прокопчук Б.И. Кимберлиты. М., Недра, 1990, 248 с.

Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во Академии наук СССР, 1955, с. 335—356.

Крамер Г. Математические методы статистики. Пер. с англ. М., Мир, 1975, 648 с.

Лутц Б.Г., Францессон Е.В. Геохимическая характеристика кимберлитов и их сравнение с ультраосновными и основными породами // Международный геологический конгресс. 25 сессия. Доклады советских геологов. Геохимия. Минералогия. Петрология. М., Наука, 1976, с. 170—180.

Маршинцев В.К. Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии. Новосибирск, Наука, 1986, 240 с.

Методические основы исследования химического состава горных пород, руд и минералов / Ред. Г.В. Остроумова. М., Недра, 1979, 400 с.

- Парсаданян К.С., Кононова В.А., Богатиков О.А.** Источники гетерогенного магматизма Архангельской алмазоносной провинции // *Петрология*, 1996, т. 4, № 5, с. 496—517.
- Пархоменко В.С.** Анализ элементного состава стандартных образцов геологических проб на основе высокоразрешающей полупроводниковой гамма-спектрометрии // *Спектрометрические методы анализа в геохимии*. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1980, с. 18—30.
- Петрохимия** кимберлитов / Под ред. А.Д. Харькива, В.В. Зуенко, Н.Н. Зинчука. М., Недра, 1991, 304 с.
- Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Ефимова Э.С.** Ксенолит катаклазированного алмазоносного дисленового эклогита из трубки «Удачная» (Якутия) // *Докл. АН СССР*, 1982, т. 255, № 1, с. 212—216.
- Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Бойд Ф.Р., Пирсон Г.Д., Шимизу Н.** Мегакристаллические пироповые перидотиты в литосфере Сибирской платформы: минералогия, геохимические особенности и проблема происхождения // *Геология и геофизика*, 1993, т. 34 (1), с. 71—84.
- Толстов А.В., Минин В.А., Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Разумов А.Н.** Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции // *Геология и геофизика*, 2009, т. 50 (3), с. 227—240.
- Томиленко А.А., Ковызин С.В., Похиленко Л.Н., Соболев Н.В.** Первичные углеводородные включения в гранате алмазоносного эклогита из кимберлитовой трубки Удачная, Якутия // *Докл. РАН*, 2009, т. 426, № 4, с. 533—536.
- Фомин А.С., Серенко В.П., Колесников Г.В., Сарычев И.К.** Геология и динамика формирования кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции // *Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков алмазных месторождений*. Мирный, Изд-во Мирнинской типографии, 1998, с. 155—157.
- Шамшина Э.А.** Коры выветривания кимберлитовых пород Якутии. Новосибирск, Наука, 1979, 150 с.
- Шацкий В.С.** Высокобарические минеральные ассоциации эклогитсодержащих комплексов Урало-Монгольского складчатого пояса: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1990, 24 с.
- Шацкий В.С., Соболев Н.В., Павлюченко В.С.** Ксенолит фассаит-гранат анортитовой породы из кимберлитовой трубки «Удачная» (Якутия) // *Докл. АН СССР*, 1983, т. 272, № 1, с. 188—192.
- Шимизу Н., Похиленко Н.П., Бойд Ф.Р., Пирсон Г.Д.** Геохимические характеристики мантийных ксенолитов из кимберлитовой трубки Удачная // *Геология и геофизика*, 1997, т. 38 (1), с. 194—205.
- Шипицин Ю.Г., Ломоносова Е.И., Шестель С.Т.** Ошибки результата измерения в инструментальном нейтронно-активационном анализе // *Нейтронно-активационный и рентгенорадиометрический анализ в геологии*. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1988, с. 50—58.
- Afanasiev V.P., Ashchepkov I.V., Palessky S.V.** Trace elements and *PT* conditions of pycroilmenites and pyropes from Archangelsk region // *ICP Inf. Newslett.*, 2006, v. 31, № 12, p. 1229.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H.** Niobian ilmenite, hydroxylapatite and sulfatian monazite alternative hosts for incompatible elements in calcite kimberlite from Internatsional'naya, Yakutia // *Van. Miner.*, 1999, v. 37, № 5, p. 1177—1189.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H.** Occurrence, alteration patterns and compositional variation of perovskite in kimberlites // *Canad. Miner.*, 2000, 38, p. 975—994.
- Clement C.R.** 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.
- Corrie Stacey.** A grain-boundary trace-element reservoir in metamorphic rocks // *ICP Inf. Newslett.*, 2006, v. 32, № 1, p. 38.
- Dalton J.A., Wood B.J.** The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wall-rock reaction in the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, Elseviers Science Publishers B.V. Amsterdam, 1993, p. 511—525.
- Haas J.R.** Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of rare earth elements at high pressures and temperatures // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, v. 59, № 21, p. 4329—4350.
- Makhotkin L., Gibson S.A., Tompson R.N., Zhuravlev D.Z., Zherdev P.U.** Late Devonian diamondiferous kimberlite and alkaline picrite (proto-kimberlite) magmatism in the Arkhangelsk region, NW Russia // *J. Petrol.*, 2000, v. 41, № 2, p. 01—227.

Sobolev V.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Jerde E.A., Neal C.R., Sobolev N.V. Quantifying the effects of metasomatism of mantle xenoliths: constraints from secondary chemistry and mineralogy in Udachnaya eclogites, Yakutia // Intern. Geol. Rev. 1999, v. 41, p. 391—416.

Taylor W.R., Tompkins L.A., Haggerty S.E. Comparative geochemistry of West African kimberlites: evidence for a micaceous kimberlite end-member of sublithospheric origin // Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, v. 58, № 19, p. 4017—4037.

Wyllie P.J., Lee W.J. Kimberlites, carbonatites, peridotites and silicate-carbonate liquid immiscibility explained in CaO-(Na₂O+K₂O)-(MgO+FeO)-(SiO₂+Al₂O₃)-CO₂ // Seventh International Kimberlite Conference. Extended abstracts. Cape Town, 1998, p. 974—976.

*Рекомендована к печати 1 марта 2011 г.
В.С. Шацким*

*Поступила в редакцию 16 октября 2009 г.,
после доработки — 1 ноября 2010 г.*