

2. Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П. Минералы Хибинского массива. М: Изд-во «Земля», 1999. 320 с.
 3. Кобяшев Ю.С. Список минералов Урала (Виды и разновидности) // Уральский геологический журнал, 2006. № 2(50). 265 с.
 4. Юшкин Н.П., Иванов О.К., Попов В.А. Введение в топоминералогия Урала. М.: Наука, 1986. 294 с.
 5. Соболева А.А., Кузенков Н.А., Удоратина О.В., Ларионов А.Н. Возраст габбро Ельминского массива (Северный Урал): результаты U-Pb датирования цирконов локальным методом // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма: Материалы III Российской конференции по изотопной геохронологии. Т. II. М.: ГЕОС, 2006. С. 291—295.
- Чуканов Н.В., Моисеев М.М., Пеков И.В., Лазебник К.А., Расцветаева Р.К., Заякина Н.В., Феррарис Дж., Ивальди Г. Набалампрофиллит $Ba(Na,Ba)\{Na_3Ti[Ti_2O_2Si_4O_{14}](OH,F)_2\}$ — новый слоистый титаносиликат группы лампрофиллита из щелочно-ультраосновных массивов Инагли и Ковдор, Россия // ЗВМО, 2004. № 1. С. 59—72.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ В ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ РАЗНОВИДНОСТЯХ КИМБЕРЛИТОВ

Василенко В.Б. , Приходько В.Л.** , Минин В.А.* , Гейко Ю.В.** , Кузнецова Л.Г.* ,
Леснов Ф.П.**

**Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия;*

***Северное государственное региональное геологическое предприятие «Пивничгеология»*

Исследование проведено по 99 опубликованным разными авторами содержаниям породообразующих оксидов и элементов редких земель (РЗЭ) в образцах кимберлитов из кимберлитовых провинций России и Северной Америки, а также Африки, Австралии и Индии. Все собранные анализы были распределены по петрохимическим разновидностям на основе популяционной петрохимической классификации кимберлитов. Корреляционный анализ показал наличие значительной сопряженности между средними содержаниями в петрохимических разновидностях породообразующих оксидов и элементов редких земель. Оказалось, что La и Pr положительно коррелируются с CaO. Тяжелые РЗЭ положительно коррелируются с TiO₂ и ΣFeO. Отношение суммарного содержания легких РЗЭ к суммарному содержанию тяжелых РЗЭ положительно коррелируются с CaO и отрицательно с MgO. Карбонатные разновидности кимберлитов обогащены легкими, а магнезиальные – тяжелыми РЗЭ. Наличие компонентов эклогитового парагенезиса приводит к обеднению кимберлитов легкими РЗЭ и продуцирует наличие отрицательных связей между SiO₂, Al₂O₃ и Na₂O с легкими РЗЭ. Авторы пришли к убеждению, что при решении петрологических проблем весьма эффективно рассматривать совместно распределение породообразующих и редкоземельных элементов.

Решение поставленной задачи существенно упрощается благодаря наличию петрохимической популяционной модели кимберлитовой формации [1-4]. В петрологическом обосновании этой модели важная роль отведена диопсиду, ильмениту, кальциту и флогопиту, которые являются основными минералами-концентраторами РЗЭ. Это дает возможность проследить поведение РЗЭ на разных стадиях формирования вещественного состава кимберлитов.

Корреляционные связи между РЗЭ и породообразующими оксидами изучены на материале коллекции химических составов кимберлитов, содержащей данные о концентрации породообразующих оксидов и РЗЭ отдельных образцов пород из разных кимберлитовых провинций. В коллекцию были включены анализы только наименее измененных пород кимберлитового клана. Принципы идентификации кимберлитов по химическому составу, использованные при отборе материала, изложены в работе [3].

Исследуемые составы кимберлитов по содержаниям главных компонентов согласно требованиям были отнесены к соответствующим группам петрохимических разновидностей. Это позволило охарактеризовать границы петрохимических разновидностей средними содержаниями РЗЭ.

Кимберлиты всех выделенных групп весьма богаты легкими лантаноидами (100-700 кратное превышение хондритовых концентраций) и обнаруживают высокую степень фракционирования РЗЭ. Отношение La/Yb варьирует в них от 38 до 508. Особенности поведения легких РЗЭ практически одинаковы в кимберлитах различных популяций, спектры тяжелых РЗЭ напротив обнаруживают некоторые различия. Содержания последних постепенно повышаются от 2 к 7 популяционной группе кимберлитов.

Распределение РЗЭ между разными группами петрохимических разновидностей неоднозначно. Средние содержания РЗЭ в разновидностях 2-й и 3-й популяций уменьшаются в более магнезиальных разновидностях. Средние содержания РЗЭ в разновидностях 5-й и 6-й популяций уменьшаются в более известковых составах. Такое поведение РЗЭ связано, по-видимому, с отличиями в составах магмогенерирующих субстратов глубинных и менее глубинных популяций. Для того чтобы убедиться в справедливости применения популяционной петрохимической модели кимберлитов построенной по материалам Якутской алмазоносной провинции для изучаемой коллекции составов кимберлитов были исследованы корреляционные связи между средними содержаниями породообразующих оксидов в группах разновидностей. Породообразующие оксиды образуют несколько корреляционных комплексов, в пределах которых они связаны тесной положительной связью. В их число входят ильменитовый ($\text{TiO}_2 \cdot \Sigma\text{FeO}$), флогопитовый ($\text{MgO} \cdot \text{K}_2\text{O}$), пироксеновый ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$) и карбонатный ($\text{CaO} \cdot \text{П.п.п.}$) корреляционные комплексы.

Карбонатный комплекс, являющийся неперменной составной частью кимберлитов, отражает присутствие в их составе первично магматического кальцита. Главная особенность этого комплекса состоит в отрицательной связи с другими корреляционными комплексами оксидов. Ильменитовый и флогопитовый комплексы оксидов связаны между собой слабой положительной связью. Пироксеновый комплекс относительно обособлен.

Необходимо отметить отсутствие четко выраженного оливинового ($\text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$) комплекса, столь характерного для кимберлитов Якутии [3]. В описываемом случае корреляционные связи оливинового комплекса ослаблены за счет появления специфических флогопитового и пироксенового комплексов. Отмеченная особенность оказывает влияние и на корреляционные связи между породообразующими оксидами и РЗЭ. Легкие РЗЭ также отрицательно коррелируются с другими оксидами пироксенового комплекса – Na_2O и, вероятно, Al_2O_3 . Подчеркивая влияние пироксенового комплекса на распределение РЗЭ заметим, что «добавление» его к составу кимберлита приводит к уменьшению содержаний La, Ce, Nd, Sm и Eu. Содержания Pr не испытывают воздействие пироксенового комплекса и демонстрируют высокую корреляцию с CaO. Положительная связь с CaO характерна и для La.

Все представители тяжелых РЗЭ обнаруживают положительную корреляцию только с оксидами титаномагнетитового комплекса. Исключение составляет только Yb, для которого установлена значительная отрицательная корреляция с CaO и положительная – с оксидами флогопитового комплекса ($\text{MgO} \cdot \text{K}_2\text{O}$). Lu занимает особое место среди РЗЭ. Этот элемент характеризуется наличием положительных связей только с Al_2O_3 и K_2O , что делает его индикатором повышенных содержаний флогопита.

Показатель степени фракционирования РЗЭ – $\Sigma(\text{La}+\dots+\text{Eu})/\Sigma(\text{Tb}+\dots+\text{Yb})$ – отрицательно коррелируется с MgO и положительно – с CaO.

Установленная отрицательная корреляция легких РЗЭ с пироксеновым комплексом оксидов должна рассматриваться как следствие разубоживания содержаний РЗЭ в результате обогащения кимберлитов материалом с более низкими содержаниями РЗЭ. Для выяснения природы этого явления обратимся к данным по петрохимии и алмазоносности кимберлитов Якутии и, в частности, кимберлитов хорошо изученной трубки Мир.

Кимберлиты этой трубки прорывают карбонатно-терригенные и галогенно-карбонатные образования кембрийской системы. Часто встречаемые повышенные содержания натрия и алюминия в кимберлитах трубки Мир некоторые исследователи связывали с контаминацией галогенных образований (ксенолиты их известны) или обработкой кимберлитов захороненными рассолами [7]. Однако участие натрия в корреляционных комплексах с алюминием и кремнием не позволило согласиться с гипотезой о галогенных образованиях как источнике натрия в кимберлитах [1-3]. В настоящей работе мы имеем возможность сравнить химические составы кимберлитов трубки Мир в трех эмпирически полученных кластерах с разным содержанием Na_2O . Главными особенностями высоконатровых составов являются пониженное содержание алмазов и меньшая степень окисленности железа. Это свидетельствует о том, что повышение содержания натрия и понижение алмазоносности произошло за счет эндогенного материала. Об этом же свидетельствуют данные об обратной корреляции концентраций хромшпинелида и алмазоносности в тяжелой фракции кимберлитов трубки Мир [6].

В кимберлитах, образованных при селективном плавлении гранатовых перидотитов, корреляционные связи легких РЗЭ с CaO (кальцитом) могут иметь большое петрологическое значение, поскольку кальций опосредованно отражает температурный режим формирования кимберлитовых расплавов. Это следует из особенностей селективного плавления перидотитов, которое начинается с клинопироксен-оливиновой котектики и в присутствии CO_2 приводит к образованию карбонатитовой жидкости.

Одним из главных минералов-концентраторов легких редких земель в породах мантии является клинопироксен, в котором лантаноиды могут замещать кальций по схеме гетеровалентного изоморфизма – $(3\text{Ca}^{2+} - 2\text{Ln}^{3+})$ и $(2\text{Ca}^{2+} - \text{NaLn}^{3+})$. Фиксируемый разброс значений ликвидусных температур в несколько сотен градусов и давлений в несколько десятков кбар создают, по всей видимости, благоприятную основу для возникновения вариаций содержания легких РЗЭ в расплавах, образующихся при селективном плавлении этой минеральной фазы. В процессе плавления происходит интенсивное экстрагирование некогерентных элементов, следствием чего является относительное обогащение остаточных фаз когерентными элементами. Деплетированные легкими РЗЭ клинопироксен и гранат из некоторых перидотитов могут, в таком контексте, рассматриваться как пример образовавшегося в процессе кимберлитогенеза мантийного рестита.

Корреляция тяжелых РЗЭ преимущественно с оксидами ильменитового комплекса позволяет считать ильменит минералом- концентратором тяжелых РЗЭ в кимберлитах. Этот факт открывает широкие возможности для использования тяжелых РЗЭ при петрологических реконструкциях, так как содержания TiO_2 в кимберлитах являются индикатором глубины формирования популяций кимберлитов. Об этом свидетельствуют геологические, минералогические [3, 4] и экспериментальные данные.

Изменение содержаний TiO_2 в кимберлитах от первых десятых долей процента до 2,6 % дает возможность для значительных колебаний содержаний тяжелых РЗЭ. Кроме того, следует учитывать и изменения в составе ильменитов разных диаметров [8], которые могут сопровождаться значительными изменениями в составе и содержаниях РЗЭ.

Один из тяжелых РЗЭ – Yb помимо корреляции с TiO_2 обнаруживает значительную положительную корреляцию с MgO и K_2O и отрицательную – с CaO , что, по-видимому, отражает возможность для Yb помимо 3-х валентного состояния находиться также и в 2-х валентном состоянии. Увеличение содержаний Yb в разновидностях с высоким содержанием K_2O происходит в связи с тем, что в исследованную коллекцию составов кимберлитов вошло значительное количество анализов слюдяных кимберлитов ($\text{K}_2\text{O} > 1.2\%$) [3], в которых повышение содержаний K_2O произошло в связи с присутствием в зонах магмогенеза наряду с перидотитами также и богатых калием пироксенитов [5].

Соотношение суммарных содержаний легких РЗЭ к суммарному содержанию тяжелых коррелируется положительно с CaO и отрицательно – с MgO . Это свидетельствует о том, что легкие РЗЭ накапливаются в карбонатных разновидностях кимберлитов. Об этом же

свидетельствуют хондрит-нормированное распределение РЗЭ в трех группах разновидностей кимберлитов всех популяций исследованной коллекции составов кимберлитов.

Выводы. Содержания РЗЭ в породах кимберлитовой формации коррелируются с содержаниями породообразующих оксидов. Сравнение проведено методом сопоставления средних составов петрохимических разновидностей пород кимберлитовой формации. В результате было установлено:

- легкие РЗЭ отрицательно коррелируются с SiO_2 , Na_2O и Al_2O_3 ;
- La и Pr положительно коррелируются с CaO;
- тяжелые РЗЭ положительно коррелируются с TiO_2 и ΣFeO ;
- Yb также коррелируется положительно с MgO, K_2O и отрицательно с CaO;
- Lu коррелируется положительно с Al_2O_3 и отрицательно с CaO;
- отношение суммарного содержания легких РЗЭ к суммарному содержанию тяжелых РЗЭ коррелируется положительно с CaO и отрицательно с MgO;
- карбонатные разновидности кимберлитов обогащены легкими и обеднены тяжелыми РЗЭ;
- магнезиальные разновидности кимберлитов обогащены тяжелыми и обеднены легкими РЗЭ.

Оценивая в целом полученные результаты отметим, что содержания РЗЭ в породах кимберлитовой формации отражают все факторы колебания химических составов пород, учитываемые петрохимической моделью кимберлитовой формации.

Индивидуальные особенности РЗЭ и изменчивость составов главных минералов-концентраторов РЗЭ в кимберлитах (кальцит, ильменит) позволяют надеяться на получение дополнительной петрологической информации. В числе новой информации может оказаться и зависимость алмазоносности кимберлитов от набора и содержаний РЗЭ. В пользу этого свидетельствуют корреляционные связи РЗЭ с петрохимическими показателями, с которыми установлены связи с алмазоносностью кимберлитов [9], но также и способность РЗЭ восстанавливать окислы до металлов, а CO и CO_2 до углерода. Наличие восстановленных металлов и углерода в селективных выплавках кимберлитового состава должно увеличивать кинетическую активность процессов образования алмазов.

Приведенные в настоящей работе материалы о количестве петрохимических разновидностей пород кимберлитовой формации и сложном строении отдельных кимберлитовых диатрем с очевидностью свидетельствуют о необходимости проводить исследования поведения РЗЭ на петрохимической основе. Данные о содержаниях РЗЭ следует сопровождать содержаниями породообразующих оксидов.

Литература

1. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Серенко В.П., Хлестов В.В. Петрохимия и алмазоносность кимберлитов Якутии // Докл.РАН, 1994. Т.338. № 1. С. 85-88.
2. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Серенко В.П. Петрохимическая модель кимберлитовой трубки Мир // Геология и геофизика., 1996. № 2. С. 97-110.
3. Василенко В.Б.; Зинчук Н.Н.; Кузнецова Л.Г. Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии // Новосибирск: Наука, 1997. – 557 с.
4. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н. Кузнецова Л.Г., 2000. К методологии геологического картирования кимберлитовых объектов на петрохимической основе. //Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Второе Всероссийское петрографическое совещание. Сыктывкар. С. 261-264.
5. Василенко В.Б.; Зинчук Н.Н.; Кузнецова Л.Г. О сопряженности составов глубинных включений и петрохимических разновидностей кимберлитов в диатремах Якутии // Петрология - 2001. - Т. 9. - N 2. - С. 209-220.
6. Зольников Г.В., Филиппов Н.Д. О содержаниях титана и хрома в компонентах кимберлитовой брекчии // Магматические образования Северо-Востока Сибирской платформы. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975. С. 169-177.

7. Павлов Д.И., Илупин И.П., Горбачева С.А. Захороненные рассолы Сибирской платформы как возможный фактор преобразования первичного состава кимберлитов // Изв. АН СССР. Сер.геол.. 1985. № 3. С. 44-53.

8. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. // Новосибирск, Наука. 1974. 264 с.

9. Vasilenko, V.B., Zinchuk, N.N., Krasavchikov, V.O., Kuznetsova, L.G., Khlestov, V.V., Volkova, N.I., 2002. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry. J. Geochemical Explor. V. 76, N2, 93-112.

КЕРСУТИТ КАК ИНДИКАТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАОСНОВНОГО РАСПЛАВА С ГРАНИТАМИ (НА ПРИМЕРЕ ДЕВЛАДОВСКОЙ ДАЙКИ, СРЕДНЕЕ ПРИДНЕПРОВЬЕ)

Великанова О.Ю., Бондаренко И.Н.

Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семеновка НАНУ, г. Киев

Девладовская дайка приурочена к Девладовской региональной зоне разломов и вытянута в субширотном направлении более чем на 9 км при ширине 300-400 м.

Ультрабазиты и основные породы Девладовской региональной зоны разломов прорывают демуринские микроклин-плагиоклазовые порфиroidные граниты и серые саксаганские плагиограниты архейского возраста и являются более поздними образованиями.

Сложена Девладовская дайка перидотитами, габбро-перидотитами, оливинитами, габбро-норитами и пироксенитами. В краевых частях ультраосновного массива породы серпентинизированы, амфиболлизированы и хлоритизированы.

Вмещающие породы на западе и в центральной части дайки представлены амфибол-биотитовыми гнейсами, мигматитами и серыми саксаганскими плагиогранитами, на востоке – розовато-серыми порфиroidными демуринскими микроклин-плагиоклазовыми гранитами, абсолютный возраст которых составляет 2850 млн. лет [2].

Основными породообразующими минералами перидотитов являются оливин, гиперстен и диопсид. В небольших количествах в верхней части разреза массива, в измененных породах, в качестве вторичных минералов почти постоянно присутствуют бурая роговая обманка (до 5%), флогопит, серпентины, актинолит, тремолит, хлорит.

В краевой части Девладовской дайки, в приконтактной зоне перидотитов и розовато-серых порфиroidных демуринских гранитов, вскрытой скважиной 2454, в интервале 155,5-158,1 м., в амфиболлизированных перидотитах установлен высокотитанистый амфибол – керсутит. Минерал в породах района выявлен впервые.

В шлифах керсутит наблюдается в виде мелких пластинчатых зерен с хорошо выраженной спайностью. Угол между трещинками призматической спайности около 56°. Окраска минерала темно-бурая с красноватым оттенком. Плеохроизм резко выражен в бурых тонах – от красновато-бурого по Ng до желтовато-бурого по Np.

В ультрабазитах Девладовской дайки керсутит является несколько более поздним минералом и развивается обычно по пироксенам или в интерстициях зерен других породообразующих силикатов.

Химический состав керсутита, сделанный на рентгеновском микроанализаторе JXA – 5, приведен в таблице.

В отличие от обыкновенной роговой обманки керсутит характеризуется повышенным содержанием TiO₂ (до 4,47%) и щелочей (Na₂O+K₂O – до 5,34%).

Керсутит в природе довольно редкий минерал и характерен обычно для щелочных и субщелочных полнокристаллических и эффузивных пород.