

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПИКРОИЛЬМЕНИТА КИМБЕРЛИТОВ

С.И. Костровицкий

*Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, г. Иркутск, serkost@igc.irk.ru*

## ORIGIN OF PICROILMENITE FROM KIMBERLITES

S.I. Kostrovitsky

*Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, serkost@igc.irk.ru*

На основе полученных данных о наиболее типичном распределении состава пикроильменита на графиках  $MgO-Cr_2O_3$  (изучен состав макрокристов ильменита из трубок Малоботуобинского поля), называемом «Параболой Хаггерти», а также данных по составу неоднородных полигранулярных зёрен из трубки Мир предлагается генетическая модель кристаллизации этого минерала. Выделяется 3 этапа образования макро-, мегакристов  $Pm$  из кимберлитов: 1) астеносферный; 2) литосферный (время прохождения, восхождения кимберлитового расплава, содержащего макрокристы  $Pm$ , через литосферную мантию); 3) диатремный. В приповерхностных условиях произошла кристаллизация микрокристаллов  $Pm$  основной массы. На 1-м этапе кристаллизовался  $Pm$  относительно низко- $Mg$  состава, возможно, из расплава ильменитового состава, образовавшегося в результате ликвационного процесса из первичного астеносферного расплава-флюида. Во время литосферного этапа за счёт ассимиляции кимберлитовым расплавом обломочного материала литосферы произошло изменение состава и  $Pm$  в сторону возрастания содержания  $MgO$  и  $Cr_2O_3$ . На диатремном этапе изменение состава  $Pm$  продолжилось, но только в сторону возрастания содержания  $MgO$ , предположительно, за счёт окислительных процессов. При этом содержание  $Cr_2O_3$  в  $Pm$  осталось неизменным, что и объясняет широко распространённый тип распределения «Парабола Хаггерти».

Происхождение пикроильменита ( $Pm$ ) – одного из ведущих типоморфных минералов кимберлитовых пород, до сих пор является предметом дискуссий. Обсуждаются разные точки зрения, в том числе за счёт дезинтеграции  $Pm$ -содержащих пород литосферной мантии (Гаранин и др., 1984; Robles-Cruz et al., 2009), как результат кристаллизации в астеносферном слое (Boyd, Nixon, 1975) и в результате процессов кристаллизации, сопряжённых с процессами формирования кимберлитов (Костровицкий и др., 1986, 2006; Mitchell, 1986; Nowell et al, 2004). Как правило,  $Pm$  встречается в виде мономинеральных образований (макро-, мегакристов, микрофенокристов), чрезвычайно редко содержащих сингенетичные микровключения других минералов, что ограничивает возможности исследования генезиса этого минерала. Наиболее доказательная аргументация при выяснении их генезиса обеспечивается изучением широких вариаций состава общей совокупности зёрен  $Pm$ , неоднородности отдельных макро- и мегакристов.

Нами изучен состав  $Pm$  из разных трубок Мало-Ботуобинского поля (Мир, Интернациональная, им. 23 съезда КПСС, Дачная, Таёжная, Амакинская, Аномалия 21). Характерной особенностью кимберлитов Малоботуобинского поля является присутствие  $Pm$ , ферримагнитного при комнатной температуре и содержащего более 10 мол. % гематитового компонента, наряду с распространённым парамагнитным (Францессон, 1968; Гаранин, Кудрявцева, 1979). При этом диапазон вариаций химического состава парамагнитного  $Pm$  для всех трубок Малоботуобинского поля один и тот же (Гаранин и др., 1984). Ильмениты из разных трубок Малоботуобинского поля близки и по усреднённому химическому составу (Илупин и др., 1978).

Рассмотренный материал позволяет выделить 3 этапа (стадии) образования макро- и мегакристов  $Pm$ : 1) астеносферный; 2) литосферный (время прохождения, восхождения кимберлитового расплава, содержащего макрокристы  $Pm$ , через литосферную мантию); 3) диатремный. В приповерхностных условиях произошла кристаллизация микрокристаллов  $Pm$  основной массы. Предполагается, что начальный этап кристаллизации  $Pm$  произошёл в астеносферном слое (Boyd, Nixon, 1975) совместно с другими мегакристами минералов низкохромистой ассоциации. Модельный расчёт расплава, из которого кри-

сталлизовались мегакристы Grt и Crx (Jones, 1987) показывает, что этот расплав отвечал составу щелочного базальтоида, характеризующегося относительно высокой железистостью и низкой хромистостью. Крупные размеры желваков Ilm (до 5–7 см), высокая насыщенность кимберлитов макро- и мегакристами Ilm, до нескольких % в некоторых трубках (например, в трубке Овал из Далдынского поля, в трубке Олимп Чомурдахского поля), встречающиеся прожилки Ilm в ксенолитах деформированных лерцоцитов, – все эти факты позволяют согласиться с предположением (Clarke, Maskau, 1990) о возможной кристаллизации Ilm из жидкости, появившейся в результате процесса ликвации.

Литосферный этап эволюции состава Ilm сказался, в 1-ю очередь, на возрастании содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и, возможно, и содержания MgO. Ilm является чутким индикатором химического состава расплава, из которого он кристаллизуется или субсолидусно перекристаллизуется. Кимберлитовый расплав-флюид по мере восхождения через литосферную мантию дезинтегрирует породы литосферной мантии, насыщается его высоко-Mg и высоко-Cr обломочным материалом и частично его контаминирует.

О 3-м этапе эволюции состава Ilm свидетельствуют особенности распределения состава Ilm в координатах MgO– $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , чётко выраженные в графиках, получивших название «Parabola Haggerty» (рис. 1) и фазовая неоднородность зёрен. Особенностью параболического распределения является наличие на соответствующих графиках симметричных двух ветвей – низко-Mg и высоко-Mg, с идентичным переменным содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Возникновение двух ветвей параболы мы объясняем следующим образом. Низко-Mg ветвь отражает распределение составов Ilm, происходящее в процессе их первичной кристаллизации в астеносферном слое и при восхождении кимберлитового расплава-флюида астеносферного происхождения через литосферную мантию и, таким образом, включает первых 2 этапа эволюции состава Ilm. Высоко-Mg ветвь параболы отражает, на наш взгляд, процесс вторичной субсолидусной перекристаллизации Ilm, вызванного изменением окислительно-восстановительного потенциала кимберлитового расплава, который, возможно, произошёл уже в коровых условиях.

Изучение фазовых неоднородностей Ilm даёт объяснение, как происходит изменение составов. Фазовая неоднородность макрокристов Ilm выражена в образовании кайм шириной до 100 мкм относительно высоко-Mg по составу (Гаранин и др., 1984; Agee et al., 1980) и в более существенном изменении состава, связанного с процессом грануляции и сопровождающей её субсолидусной полной или частичной перекристаллизацией отдельных гранул, чаще в периферийных зонах макрокристов (рис. 2). Грануляция и перекристаллизация были вызваны изменением P-T-fO<sub>2</sub> параметров расплава (фугитивности в сторону большей окисленности) при его дальнейшем восхождении. Субсолидусная перекристаллизация Ilm, ускоренная процессом грануляции, сопровождалась частичным выносом окисленного Fe, Ti и Mn и соответствующим возрастанием его магнезиальности. В интерстициях отдельных гранул полигранулярных зёрен, а также на периферии высоко-Mg кайм макрокристов обнаруживаются титаномагнетит, Mn-содержащий пикроильменит, рутил. Особенностью данного процесса является то, что содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в макрокристах Ilm, судя по графику MgO– $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (рис. 3) оставалось неизменным или изменялось незначительно.

Согласно экспериментам (Green, Sobolev, 1975), пикроильменит относится к минералам, чутко реагирующим на изменение состава кристаллизующей среды. Это указывает на отсутствие заметных изменений в составе кимберлитового расплава во время процесса субсолидусной перекристаллизации находящегося в нём Ilm. Изменение только магнезиальности зёрен Ilm при неизменном содержании  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и обусловило распределение составов, отражённое на графиках «параболой Haggerty».

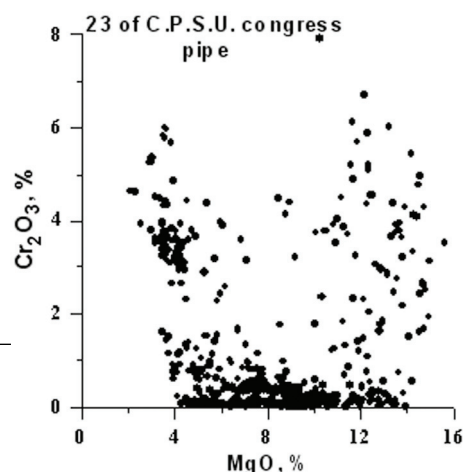


Рис. 1. Распределение состава ильменита (Ilm) на графике MgO– $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , названное параболой Хаггерти (Haggerty, 1975).

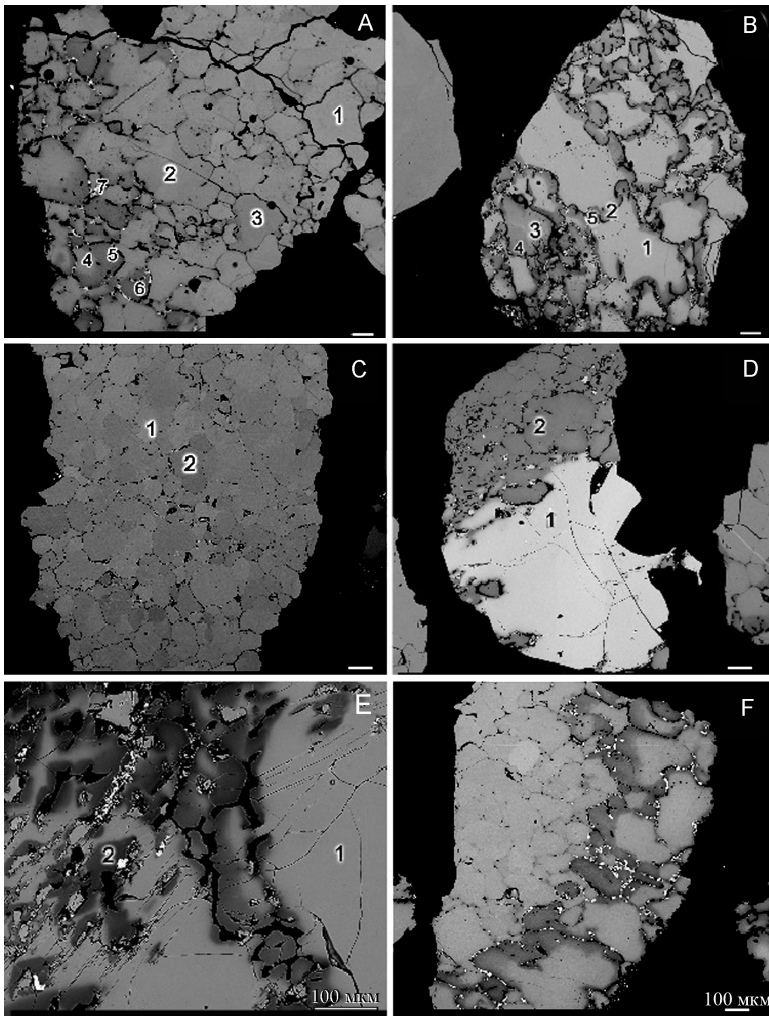


Рис. 2. Полигранулярные зёрна ильменита из трубки Мир. Более тёмные участки (BSE COMPO) – с более магниезильным составом; А – неравномернoзернистая грануляция и образование микротрещин по границам гранул; В – изменение состава Птм в краевых зонах гранул, сопровождающееся полным изменением состава; С – общая равномерная грануляция с изменением состава отдельных гранул; D – частичное развитие грануляции; E – изменение состава Птм происходит на краю зерна и по микротрещинам; F – неравномерная грануляция, сопровождающаяся выносом железа и возрастанием магниезильности отдельных гранул Птм.

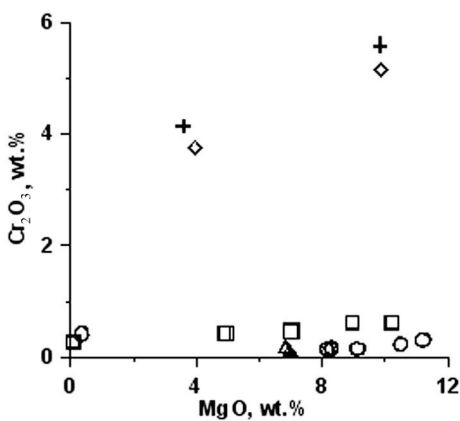


Рис. 3. График состава отдельных зёрен полигранулярного Птм в координатах MgO–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> меняется незначительно при заметном изменении MgO.

Следует заметить, что, кроме параболического распределения состава Птм (характерного для трубок Малоботуобинского поля), встречаются и другие типы распределения на графике MgO–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, например, ступенчатое, при котором каждая из ступеней фиксирует изменение содержания MgO на определённом интервале при постоянном Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Костровицкий и др., 2006).

Заключительный этап кристаллизации (возможно, субсолидусной перекристаллизации мелких зёрен) представлен Птм основной массы; в его составе максимально высокое содержание MgO (до 15 мас. %) и низкое содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (как правило, менее 0.3 %) в Птм из кимберлитов трубки Мир свидетельствуют о процессе, вызванном возрастанием окислительного потенциала и значительным выпадением в результате этого из расплава магнетита и, возможно, глинозёмистой шпинели. Высокая магниезильность остаточного расплава обусловила соответствующий состав кристаллизующегося Птм. Не исключено, что этот этап совпал с началом процесса позднемагматической серпентинизации кимберлитов. Более высокое содержание MgO в Птм основной массы по сравнению макро- и мегакристаллами Птм подтверждается и литературными данными (Vostor, Boyd, 1980; Pasteris, 1980).

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 14-5-91156.

## Литература

- Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П.* Некоторые зависимости «состав–структура–свойства» для ильменита из кимберлитов Якутии и их минералогическое значение // Зап. ВМО. 1979. Ч. 108. № 1. С. 38–47.
- Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.Т.* Ильменит из кимберлитов. М.: Изд-во МГУ. 1984. 240 с.
- Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францессон Е.В.* Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.
- Костровицкий С.И.* Геохимические особенности минералов кимберлитов. Новосибирск: Наука, 1986. 263 с.
- Костровицкий С.И., Алымова Н.В., Яковлев Д.А., Серов И.В., Иванов А.С., Серов В.П.* Особенности химического состава пикроильменита из алмазоносных полей Якутской провинции // ДАН. 2006. Т. 406. № 3. С. 350–354.
- Францессон Е.В.* Петрология кимберлитов. М.: Недра, 1968. 200 с.
- Agee J.J., Garrison J.R., Jr, and Taylor L.A.* Petrogenesis of oxide minerals in kimberlite, Elliot County, Kentucky // Am. Min. 1982. V. 67. P. 28–42.
- Boctor N.Z., Boyd F.R.* Oxide minerals in the Liqhpobong kimberlite, Lesotho // Am. Min. 1980. V. 65. P. 631–638.
- Boyd F.R., Nixon P.H.* Origin of the ultramafic nodules from some kimberlites of Northern Lesotho and the Monastery Mine, South Africa / Physics and Chemistry of the Earth. New York: Pergamon Press, 1975. V. 9. P. 431–454.
- Clarke, D.B., Mackay, R.M.* Ilmenite–garnet–clinopyroxene nodule from Matsoku. Evidence for oxide-rich liquid immiscibility in kimberlites // Can. Min. 1990. V. 28, Issue 2. P. 229–239.
- Green D.H., Sobolev N.V.* Coexisting garnets and ilmenites synthesized at high pressures from pyrolite and olivine basanite and their significance for kimberlitic assemblages // Contrib. Mineral. Petrol. 1975. V. 50. P. 217–229.
- Griffin W.L., Moore R.O., Ryan C.G., Gurney J.J., and Win T.T.* Geochemistry of magnesian ilmenite megacrysts from Southern African kimberlites // Russian Geology and Geophysics. 1997. V. 38. N 2. P. 398–419.
- Haggerty S.E.* The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlite / Physics and chemistry of the Earth. New York: Pergamon Press, 1975. V. 9. P. 227–243.
- Jones R.A.* Sr and Nd isotopic and rare earth element evidence for the genesis of megacrysts in kimberlites of southern Africa / Mantle xenoliths (edit. by P.H.Nixon, J. Wiley & Sons Ltd. 1987. P. 711–724.
- Mitchell R.H.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology. New York: Plenum Press, 1986. 442 p.
- Nowell G.M., Pearson D.G., Bell D.R., Carlson R.W., Smith C.B., and Noble S.R.* Hf isotope systematics of kimberlites and their megacrysts: new constraints on their source regions // J. Petrology, 2004. V. 45. N. 5. P. 1583–1612.
- Pasteris J.D.* The significance of groundmass ilmenite and megacryst ilmenite in kimberlites // Contrib. Mineral. Petrol., 1980. V. 75. N 4. P. 315–325.
- Robles-Cruz S. E., Watangua M., Isidoro L., Melgarejo J.C., Galн S. and Olimpio A.* Contrasting compositions and textures of ilmenite in the Catoca kimberlite, Angola, and implications in exploration for diamond // Lithos, 2009. V. 112S. P. 966–975.