

## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПИРОПОВ АНОМАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗ ЛЕРЦОЛИТОВ (свидетельства эволюции литосферной мантии Сибирской платформы)

Н.С. Тычков, Н.П. Похиленко, С.С. Кулигин, Е.В. Малыгина

*Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Проанализированы на главные элементы (включая Ti, Mn, Na) более 1000 зерен пиропов из кимберлитовых трубок Муза (J<sub>3</sub>) и Ивушка (D–C) — северо-восток Сибирской платформы, Хоркич (MZ) — юго-западная часть платформы, из аллювиальных отложений Муно-Мархинского междуречья, а также из ксенолитов зернистых перидотитов тр. Удачная. Проведенные исследования позволили нам выделить и описать группу пиропов аномального для лерцолитового парагенезиса состава (пиропов ЛАС), преобладающих в тр. Муза и широко распространенных в различных регионах, как отдельный парагенетический тип. Пиропы ЛАС во всех известных случаях принадлежат зернистым гарцбургитам с акцессорным клинопироксеном, *PT*-условия образования которых в большинстве случаев не превышают 50 кбар и 1000 °С. Наши исследования и обобщенные литературные данные дают основания предполагать, что пиропы ЛАС могут образоваться в результате воздействия на истощенные перидотиты литосферной мантии расплавов, отвечающих высоким степеням плавления вещества примитивной мантии.

Характер палеогеотермы и распределение пиропов ЛАС в разновозрастных кимберлитах и вторичных коллекторах Сибирской платформы свидетельствуют о значительном утонении литосферной мантии с.-в. части Сибирской платформы и существенном увеличении в этом регионе роли пород, характеризующихся пиропами ЛАС от палеозойского времени к мезозойскому, а также о присутствии большого количества таких пород в литосферной мантии центральных частей платформы. Эти факты, а также существенное изменение состава пород литосферной мантии и в ю.-з. части платформы в этом промежутке времени, свидетельствуют о том, что воздействие пермотриасового сибирского плюма на литосферную мантию платформы существенно изменило в различных частях ее состав и строение.

*Кимберлиты, пиропы ЛАС, лерцолиты, пироксениты, литосферная мантия, строение, Сибирская платформа.*

## COMPOSITION AND ORIGIN OF PECULIAR PYROPEs FROM LHERZOLITES AS EVIDENCE FOR THE EVOLUTION OF THE LITHOSPHERIC MANTLE OF THE SIBERIAN PLATFORM

N.S. Tychkov, N.P. Pokhilenko, S.S. Kuligin, and E.V. Malygina

More than 1000 pyropes from the Muza (J<sub>3</sub>), Ivushka (D–C) (northeastern Siberian Platform), and Horkich (MZ) (southwestern part of the platform) kimberlite pipes, alluvial deposits of the Muna–Markha area, and granular peridotites of the Udachnaya pipe were analyzed for major elements, including Ti, Mn, and Na. As a result, a group of pyropes was distinguished whose composition is not typical of the lherzolite paragenesis (LAC pyropes), which are predominant in the Muza pipe and are widespread over the world. This group is described as a separate paragenetic type. In all known cases, LAC pyropes belong to granular clinopyroxene-bearing harzburgites, whose in situ conditions are typically below 50 kbar and 1000 °C. Our own and literature data suggest that LAC pyropes can appear when the magmas corresponding to the high-degree melting of the parental magma affect the depleted peridotites of the lithospheric mantle.

The character of paleogeotherm and distribution of LAC pyropes in diachronous kimberlites and secondary collectors of the Siberian Platform indicate that the lithospheric mantle was considerably thinned in the northeastern Siberian Platform and the rocks characterized by LAC pyropes played an increasingly more important role in the period from Paleozoic to Mesozoic, and that these rocks were abundant in the lithospheric mantle of the central parts of the platform. These facts as well as a considerable change in the rock composition in the lithospheric mantle and in the southwestern part of the platform in the same period suggest that the effect of the Permo-Triassic Siberian plume on the lithospheric mantle of the platform considerably changed its composition and structure.

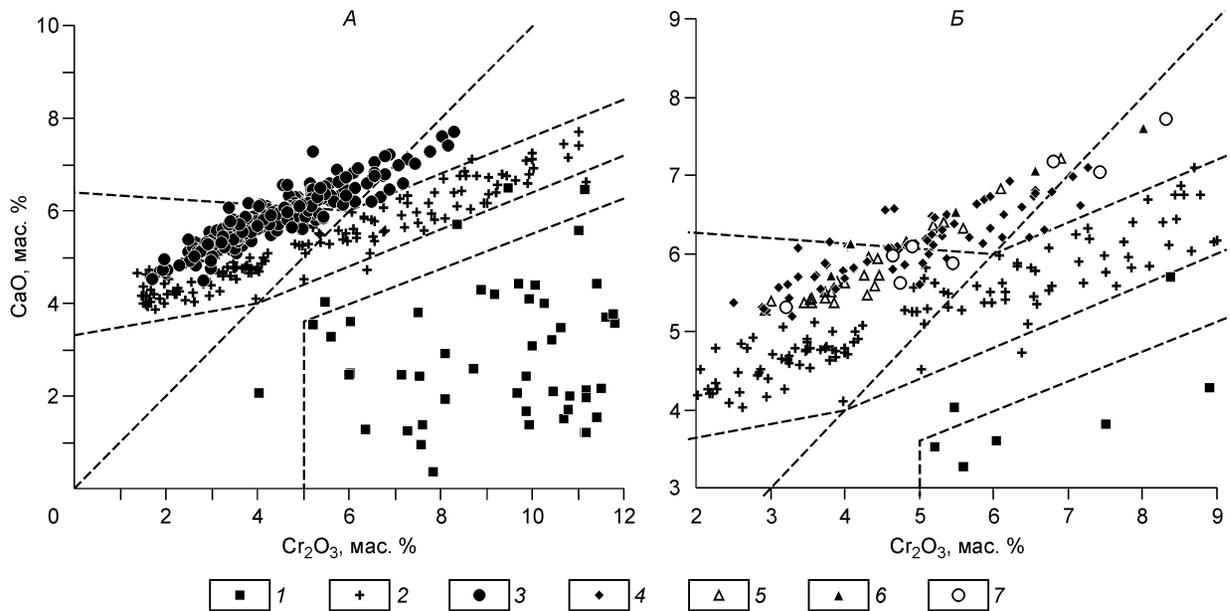
*Kimberlites, LAC pyropes, lherzolites, pyroxenites, lithospheric mantle, structure, Siberian Platform*

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетние поисковые работы на Сибирской платформе выявили в северо-восточной ее части кимберлитовые тела, относящиеся к различным временным циклам проявления магматизма. Среди них присутствуют как молодые кимберлитовые тела верхнеюрского возраста, так и более ранние допермские, вероятно, D–C времени внедрения. Всего на Сибирской платформе известно три цикла активизации кимберлитового магматизма: D<sub>3</sub>–C<sub>1</sub> (367—345 млн лет), T (245—215 млн лет), J<sub>3</sub> (160—149 млн лет) [Брахфогель, 1984; Кинни и др., 1997; Griffin et al., 1999]. Цикл тектонотермальной активизации Сибирской

платформы, имевший место примерно на границе пермского и триасового периодов, проявился в виде интенсивного, но достаточно кратковременного цикла траппового магматизма на обширных территориях в пределах платформы с максимальной интенсивностью 245—250 млн лет назад. Это масштабное событие воздействовало и, вероятно, существенно преобразовало литосферную мантию кратона [Похиленко, Соболев, 1998; Pokhilenko et al., 1999, 2002; Griffin et al., 1999]. Подавляющее большинство кимберлитов мезозойского возраста здесь неалмазоносны, а мантийные минералы и ксенолиты, выносимые ими, имеют более обогащенный характер по сравнению с мантийными нодулями из палеозойских кимберлитов [Похиленко, 1990]. Н.П. Похиленко с соавторами [Pokhilenko et al., 1999] на основе сравнительного изучения около 20 тысяч пиропов из более чем ста кимберлитовых трубок Сибирской платформы, делают вывод о существенном изменении состава и утонении литосферы северо-восточной ее части к верхнеюрскому времени. Данные об изменении мощности литосферы и теплового потока авторы получают исходя из геотерм [Ryan et al., 1996], построенных по гранатам разновозрастных кимберлитовых трубок и домезозойских алмазоносных россыпей района. По этим данным, мощность литосферы региона составляет 180—230 км в палеозойское время и около 130—150 км в мезозойское, а тепловой поток изменяется соответственно от 37 до 40—41 мВт/м<sup>2</sup>. В 1999 г. В. Гриффин с соавторами [Griffin et al., 1999] повторяют эти результаты, уточняя положение нижней границы литосферы на гранатовой геотерме уровнем максимальной температуры распределения гранатов, обедненных Y, представляющих деплетированное вещество литосферы. В работе [Pokhilenko et al., 1999] приводится ряд свидетельств изменения состава литосферы этого района от палеозойского к мезозойскому времени, выразившемся в изменении среднего состава пиропов из кимберлитов района, а именно понижении среднего содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, повышении среднего содержания FeO и др. Аналогичная тенденция подчеркивалась и ранее при анализе средних составов пиропов из трубок различных районов Якутской алмазоносной провинции [Соболев и др., 1978].

Как показали более детальные исследования [Тычков, 2004а,б, 2006а,б; Тычков и др., 2007], указанные изменения среднего состава пиропов обязаны, в частности, наличию в кимберлитовом концентрате мезозойских трубок северо-восточных районов Сибирской платформы большого количества пиропов аномального для лерцолитового парагенезиса состава. Аномальность состава этих пиропов состоит, например, в том, что распределение их составов на парагенетической дискриминационной диаграмме Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CaO [Соболев, 1971, 1974] образует четкий тренд, не соответствующий широко распространенному „лерцолитовому тренду“. Отличие состоит в ином соотношении содержаний Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO, благодаря чему высокохромистая часть тренда попадает в поле гранатов верлитового парагенезиса (рис. 1).



**Рис. 1.** Парагенетическая дискриминационная диаграмма Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CaO [Соболев, 1974].

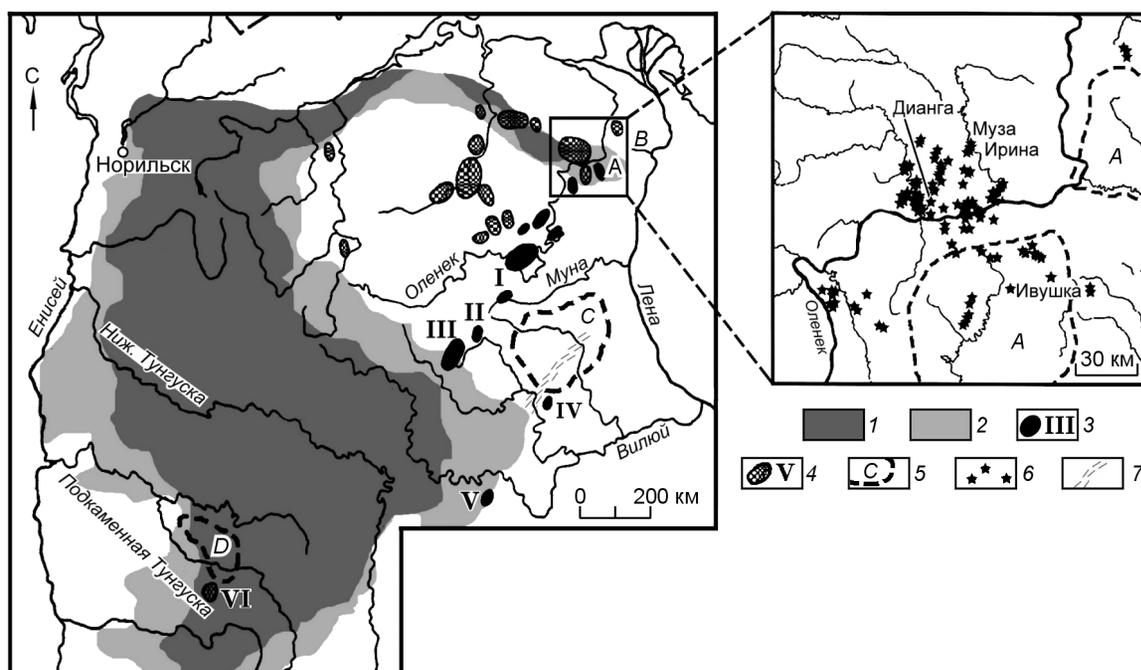
А: 1 — пиропы из ксенолитов гарцбургит-дунитов (ГД) тр. Удачная, 2 — пиропы из ксенолитов катаклазированных перидотитов (КП) тр. Удачная, 3 — пиропы лерцолитовые аномального состава (ЛАС) из различных трубок; Б: пиропы ЛАС из ксенолитов зернистых перидотитов (ЗП) различных трубок: 4 — тр. Удачная, 5 — тр. Джерико, 6 — трубок Восточно-Финской кимберлитовой провинции, 7 — тр. Таба-Путса. Штриховые линии — поля составов генетических типов пиропов.

Целью настоящего исследования является выяснение природы возникновения пиропов аномального состава, а также причины резкого увеличения количества таких пиропов в кимберлитах северо-востока Сибирской платформы к мезозойскому времени относительно палеозойского. Были сформулированы следующие задачи исследований: описать характерные черты состава упомянутых пиропов, изучить минеральный состав, структуру, условия существования и, в конечном итоге, происхождение пород, содержащих пиропы аномального состава, описать закономерности распространения этих пиропов в разновозрастных кимберлитах, промежуточных коллекторах и современных аллювиальных отложениях Сибирской платформы.

### ПРЕДМЕТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа основывается на полученных нами новых данных по содержанию главных элементов (включая Ti, Mn, Na) в более чем 940 зернах пиропов из тр. Муза (J<sub>2</sub>) и Ивушка (D—C), расположенных в с.-в. части платформы, тр. Хоркич (Тайгикун-Нембинское кимберлитовое поле — MZ), расположенной в ю.-з. части платформы, из аллювиальных отложений Муно-Мархинского междуречья (центрально-восточная часть Сибирской платформы). Кроме того, мы использовали данные по составу минералов из 275 зернистых лерцолитов тр. Удачная [Малыгина, 2002], а также полученные нами данные в результате доизучения 34 зернистых лерцолитов тр. Удачная (Далдынское кимберлитовое поле — PZ) и неопубликованные ранее данные из архива лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) по составу пиропов из концентрата ряда мезозойских трубок и промежуточных коллекторов среднепалеозойского возраста с.-в. и ю.-з. частей Сибирской платформы (рис. 2). Особое внимание уделялось пиропам, характерным для тр. Муза и ряда трубок Сибирской платформы и других регионов, обладающих необычным составом для истощенных лерцолитов внутрикратонных областей, а также породам, содержащим такие пиропы.

В кимберлитовой тр. Муза до сих пор не было обнаружено ксенолитов, однако наши исследования ксенолитов тр. Удачная, содержащих такие пиропы, а также работы других исследователей [Nixon, Boyd, 1973; Korylova et al., 1999; Peltonen et al., 1999; Малыгина, 2002] показывают, что они принадлежат гранатовым и гранат-шпинелевым зернистым перидотитам (ЗП). Несмотря на фактическую принадлежность пиропов к лерцолитовому парагенезису, образуемый такими пиропами на диаграмме Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—СаО тренд заметно отличается от широко распространенного „лерцолитового“ (см. рис. 1). Далее для



**Рис. 2. Схема расположения кимберлитовых полей и некоторых вторичных коллекторов ИМК на Сибирской платформе.**

1, 2 — поле распространения на поверхности траппов: 1 — эффузивных, 2 — интрузивных; 3, 4 — кимберлитовые поля: 3 — палеозойского возраста (I — Верхнемунское, II — Далдынское, III — Алакитское, IV — Накынское, V — Мирнинское), 4 — мезозойского возраста (VI — Тайгикун-Нембинское); 5 — вторичные коллекторы ИМК (A — конгломераты Кютюнгинского грабена PZ<sub>2</sub>, B — современный аллювий р. Элизитибий, C — современный аллювий гидросети Муно-Мархинского междуречья, D — Тычанский алмазоносный район PZ); 6 — кимберлитовые трубки; 7 — дайковый комплекс базитов.

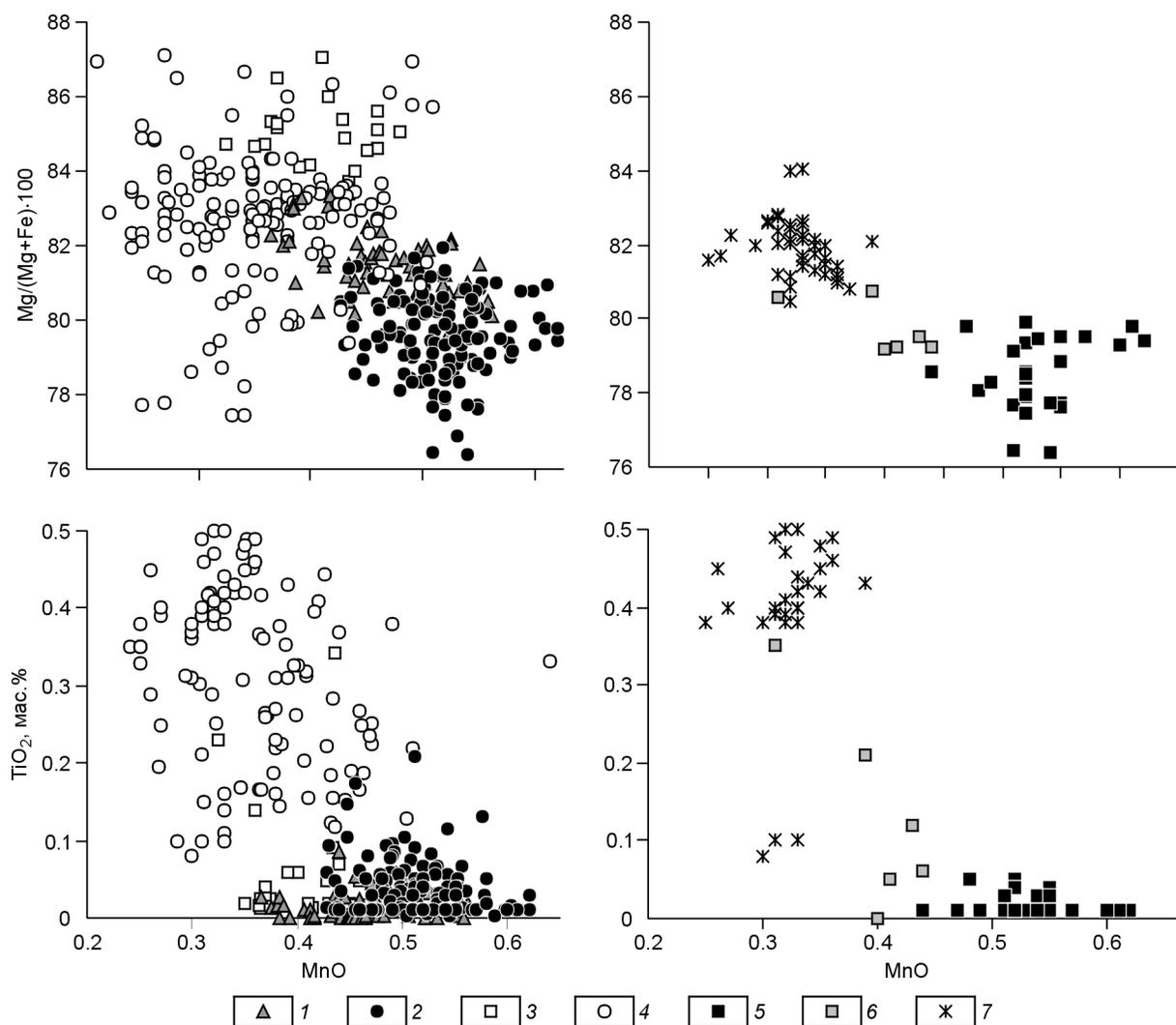
краткости пиропы описываемой группы будем называть пиропы „лерцолитовые аномального состава“ (пиропы ЛАС).

Изучение состава пироповых гранатов и ассоциирующих с ними минералов проводилось с помощью рентгеноспектрального анализатора Camebax Micro в лаборатории электронного микрондирования и электронной микроскопии ИГМ СО РАН. Изучение геохимических особенностей минералов проводилось методом масс-спектрометрии индукционно-связанной плазмы с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) [Kuligin et al., 2000].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Особенности состава пиропов ЛАС.** Помимо аномального положения на парагенетической дискриминационной диаграмме  $\text{Sr}_2\text{O}_3$ —CaO (повышенной кальциевости), характерными отличиями состава пиропов ЛАС от пиропов других генетических типов являются повышенное содержание FeO, пониженное MgO, фактическое отсутствие в большинстве случаев  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , повышенное содержание MnO (рис. 3, табл. 1, 2).

Известно, что существует прямая зависимость вхождения Mn в гранат при увеличении содержания Ca в сосуществующем клинопироксене [Delaney et al., 1979]. Последнее контролируется в лерцолитах степенью вхождения в клинопироксен энстатитового компонента и зависит от температуры [Davis, Boyd, 1966]. По экспериментальным данным [Brey, Kohler, 1990a], содержание MnO существенно повышается



**Рис. 3. Состав пиропов различных типов в координатах MnO—TiO<sub>2</sub>, MnO—Mg/(Mg + Fe)·100.**

1 — из ксенолитов ЗП тр. Удачная, 2 — из кимберлитового концентрата тр. Муза, ксенолитов ЗП тр. Джерико, трубок Восточно-Финской провинции; 3 — из ксенолитов ГД тр. Удачная, 4 — КП тр. Удачная; 5—7 — состав пиропов из ксенолитов тр. Джерико: 5 — пиропы ЛАС из ксенолитов ЗП, 6 — пиропы обычного лерцолитового состава из ксенолитов ЗП, 7 — пиропы из ксенолитов КП, по [Korylova et al., 1999].

Таблица 1.

## Представительные анализы исследованных пиропов (мас.%)

| Номер образца | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO     | FeO  | MgO  | CaO | Na <sub>2</sub> O | Сумма |
|---------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------|------|-----|-------------------|-------|
| 1             | 41.1             | 0.20             | 17.9                           | 6.6                            | 0.32    | 6.5  | 19.7 | 6.5 | 0.02              | 98.8  |
| 2             | 40.8             | 0.50             | 19.1                           | 5.0                            | 0.35    | 7.6  | 19.1 | 6.2 | 0.05              | 98.6  |
| 3             | 41.2             | 0.40             | 20.3                           | 3.5                            | 0.37    | 8.5  | 19.5 | 5.4 | 0.04              | 99.1  |
| 4             | 40.8             | 0.55             | 19.7                           | 4.0                            | 0.34    | 8.3  | 19.9 | 5.6 | 0.04              | 99.2  |
| 5             | 41.4             | 0.34             | 20.0                           | 4.3                            | 0.37    | 6.3  | 20.9 | 5.3 | 0.03              | 99.0  |
| 6             | 41.2             | 0.65             | 19.7                           | 4.4                            | 0.33    | 7.1  | 20.6 | 5.8 | 0.05              | 99.8  |
| 7             | 41.7             | 0.30             | 21.0                           | 2.4                            | 0.27    | 8.4  | 20.0 | 5.1 | 0.04              | 99.2  |
| 8             | 41.6             | 0.52             | 21.8                           | 1.5                            | 0.29    | 7.8  | 20.8 | 4.9 | 0.05              | 99.2  |
| 9             | 41.2             | 0.07             | 18.9                           | 6.0                            | 0.32    | 6.5  | 20.4 | 6.0 | 0.02              | 99.5  |
| 10            | 41.5             | 0.14             | 19.6                           | 4.8                            | 0.32    | 6.7  | 20.7 | 5.5 | 0.01              | 99.2  |
| 11*           | 42.1             | 0.18             | 21.8                           | 1.7                            | 0.46    | 9.5  | 19.3 | 4.5 | 0.05              | 99.6  |
| 12*           | 41.9             | 0.10             | 21.3                           | 2.6                            | 0.45    | 8.8  | 18.6 | 5.3 | 0.03              | 99.2  |
| 13*           | 41.9             | 0.03             | 21.4                           | 2.7                            | 0.47    | 8.8  | 19.3 | 5.1 | 0.02              | 99.6  |
| 14*           | 42.1             | 0.04             | 20.9                           | 3.4                            | 0.54    | 8.7  | 19.0 | 5.3 | 0.02              | 100.0 |
| 15*           | 41.8             | 0.01             | 20.5                           | 3.6                            | 0.53    | 8.6  | 19.1 | 5.6 | 0.03              | 99.7  |
| 16*           | 42.0             | 0.03             | 20.3                           | 4.2                            | 0.58    | 8.8  | 18.6 | 6.0 | 0.02              | 100.6 |
| 17*           | 41.7             | 0.11             | 19.9                           | 4.6                            | 0.49    | 7.6  | 19.8 | 5.2 | 0.04              | 99.3  |
| 18*           | 41.0             | 0.05             | 19.9                           | 4.6                            | 0.58    | 8.4  | 18.6 | 5.9 | 0.01              | 99.0  |
| 19*           | 42.2             | 0.01             | 20.0                           | 4.7                            | 0.52    | 8.3  | 18.8 | 6.0 | 0.03              | 100.5 |
| 20*           | 42.3             | 0.01             | 19.8                           | 5.2                            | 0.57    | 8.0  | 19.0 | 6.0 | 0.02              | 100.9 |
| 21*           | 41.9             | 0.01             | 19.7                           | 5.3                            | 0.61    | 8.0  | 19.0 | 6.1 | 0.03              | 100.6 |
| 22*           | 41.5             | 0.01             | 19.0                           | 5.9                            | 0.48    | 7.8  | 18.1 | 6.5 | 0.02              | 99.2  |
| 23*           | 41.8             | 0.01             | 18.3                           | 6.8                            | 0.50    | 8.0  | 18.4 | 6.7 | 0.01              | 100.4 |
| 24            | 41.2             | 0.70             | 21.5                           | 0.4                            | 0.34    | 11.8 | 18.7 | 4.7 | 0.12              | 99.3  |
| 25            | 42.3             | 0.63             | 21.4                           | 1.5                            | 0.28    | 8.8  | 20.5 | 4.8 | 0.07              | 100.1 |
| 26            | 42.5             | 0.56             | 20.8                           | 2.4                            | 0.26    | 7.8  | 21.1 | 4.7 | 0.09              | 100.2 |
| 27            | 42.6             | 0.67             | 20.4                           | 2.6                            | 0.30    | 7.6  | 21.1 | 4.9 | 0.07              | 100.3 |
| 28            | 42.0             | 0.57             | 20.7                           | 3.0                            | 0.32    | 7.4  | 20.3 | 5.1 | 0.08              | 99.6  |
| 29            | 41.4             | 0.16             | 20.8                           | 3.5                            | 0.36    | 7.6  | 20.7 | 5.0 | 0.05              | 99.5  |
| 30*           | 41.8             | 0.01             | 20.8                           | 3.8                            | 0.59    | 8.4  | 18.5 | 6.2 | 0.02              | 100.2 |
| 31            | 42.4             | 0.69             | 19.2                           | 4.9                            | 0.28    | 6.6  | 21.2 | 5.1 | 0.14              | 100.4 |
| 32            | 41.8             | 0.13             | 18.7                           | 6.1                            | 0.32    | 6.4  | 20.2 | 5.9 | 0.02              | 99.6  |
| 33            | 42.4             | 0.20             | 19.1                           | 6.2                            | 0.30    | 5.8  | 23.3 | 3.2 | 0.08              | 100.6 |
| 34            | 41.8             | 0.50             | 16.9                           | 8.1                            | 0.34    | 6.0  | 20.4 | 5.9 | 0.06              | 100.1 |
| 35*           | 42.0             | 0.02             | 21.4                           | 3.0                            | 0.55    | 8.4  | 19.3 | 5.5 | 0.04              | 100.1 |
| 36            | 42.4             | 0.33             | 20.1                           | 4.6                            | 0.31    | 6.2  | 21.7 | 4.9 | 0.07              | 100.6 |
| 336/89*       | 40.8             | 0.00             | 17.3                           | 7.8                            | 0.48    | 7.4  | 18.6 | 7.5 | 0.02              | 99.8  |
| 336/89*       | 40.8             | 0.00             | 17.0                           | 8.2                            | 0.51    | 7.4  | 18.9 | 7.5 | 0.03              | 100.3 |
| 304/89*       | 41.1             | 0.00             | 19.9                           | 4.4                            | 0.55    | 8.0  | 19.7 | 6.1 | 0.01              | 99.7  |
| 304/89*       | 41.0             | 0.00             | 18.4                           | 6.3                            | 0.56    | 7.9  | 18.3 | 7.5 | 0.02              | 99.9  |
| 50/93*        | 41.3             | 0.03             | 20.2                           | 3.7                            | 0.50    | 7.8  | 19.9 | 5.7 | 0.04              | 99.1  |
| 50/93*        | 41.3             | 0.03             | 20.0                           | 4.2                            | 0.53    | 7.8  | 20.0 | 5.9 | 0.04              | 99.8  |
| 50/93*        | 40.9             | 0.05             | 18.9                           | 5.4                            | 0.50    | 7.8  | 19.5 | 6.5 | 0.04              | 99.5  |
| 19/91*        | 41.8             | 0.04             | 19.7                           | 5.4                            | 0.50    | 7.9  | 19.0 | 6.2 | 0.01              | 100.5 |
| 19/91         | 41.4             | 0.00             | 15.6                           | 11.3                           | Не опр. | 6.6  | 22.4 | 2.5 | Не опр.           | 99.8  |
| 423/86*       | 42.0             | 0.07             | 19.2                           | 5.6                            | »       | 7.7  | 20.9 | 3.6 | 0.08              | 99.1  |
| 423/86*       | 41.6             | 0.01             | 21.1                           | 3.3                            | »       | 8.4  | 19.2 | 5.4 | 0.01              | 99.0  |
| 149/89*       | 41.5             | Не опр.          | 19.6                           | 5.8                            | »       | 8.1  | 18.6 | 6.5 | Не опр.           | 100.1 |
| 149/89*       | 41.3             | »                | 19.0                           | 7.1                            | »       | 7.7  | 18.1 | 6.9 | »                 | 100.1 |
| 149/89*       | 41.0             | 0.02             | 16.9                           | 8.9                            | »       | 7.7  | 19.1 | 5.5 | 0.02              | 99.1  |

Примечание. Пиропы из кимберлитового концентрата тр. Хоркич (1—10), Муза (11—23), Ивушка (24—36) и ксенолитов ЗП тр. Удачная (336/89, 304/89, 50/93, 19/91, 423/86, 149/89). Не опр. — не определялось.

\* Пиропы ЛАС.

Таблица 2.

Усредненные составы пиропов из различных источников и пиропов различных генетических типов (мас.%)

| № п/п | Трубка, отложение                        | Тип              | x, s | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | MnO  | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | Сумма | T  |
|-------|--|------------------|------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|-------|----|
| 1     | Муза<br>n = 97                           | ЛАС              | x    | 41.9             | 0.04             | 20.4                           | 3.98                           | 8.47 | 0.51 | 18.9 | 5.67 | 0.03              | 99.9  | MZ |
|       |  |                  | s    | 0.43             | 0.03             | 0.86                           | 1.12                           | 0.48 | 0.04 | 0.48 | 0.57 | 0.01              | —     |    |
| 2     | Ивушка<br>n = 7                          | »                | x    | 41.9             | 0.02             | 21.0                           | 3.23                           | 8.79 | 0.56 | 18.8 | 5.74 | 0.03              | 100.1 | PZ |
|       |  |                  | s    | 0.21             | 0.01             | 0.55                           | 0.77                           | 0.49 | 0.05 | 0.33 | 0.45 | 0.01              | —     |    |
| 3     | Удачная<br>n = 34                        | »                | x    | 41.9             | 0.02             | 19.8                           | 4.66                           | 7.66 | 0.43 | 19.1 | 5.95 | 0.02              | 99.5  | »  |
|       |  |                  | s    | 0.29             | 0.03             | 1.09                           | 1.30                           | 0.35 | 0.05 | 0.60 | 0.46 | 0.02              | —     |    |
| 4     | Муно-Мархинское<br>междуречье<br>n = 159 | »                | x    | 41.7             | 0.07             | 20.9                           | 3.37                           | 8.61 | 0.48 | 19.1 | 5.45 | 0.02              | 99.8  | ?  |
|       |  |                  | s    | 0.30             | 0.04             | 0.81                           | 1.08                           | 0.61 | 0.05 | 0.54 | 0.55 | 0.01              | —     |    |
| 5     | Джерико<br>n = 27                        | »                | x    | 41.1             | 0.02             | 20.7                           | 4.32                           | 8.91 | 0.54 | 18.3 | 5.81 | 0.02              | 99.7  | MZ |
|       |  |                  | s    | 0.37             | 0.01             | 0.79                           | 0.93                           | 0.38 | 0.05 | 0.44 | 0.49 | 0.01              | —     |    |
| 6     | Удачная<br>n = 7                         | ЛАС (из<br>OPxt) | x    | 41.8             | 0.05             | 19.8                           | 4.63                           | 7.80 | 0.43 | 19.0 | 6.02 | 0.03              | 99.6  | PZ |
|       |  |                  | s    | 0.21             | 0.03             | 1.05                           | 1.33                           | 0.52 | 0.05 | 0.66 | 0.55 | 0.02              | —     |    |
| 7     | Муно-Мархинское<br>междуречье<br>n = 450 | шл.п.            | x    | 41.9             | 0.35             | 19.5                           | 4.65                           | 6.91 | 0.31 | 20.9 | 4.90 | 0.05              | 99.5  | ?  |
|       |  |                  | s    | 0.45             | 0.23             | 1.36                           | 1.82                           | 0.77 | 0.06 | 0.91 | 0.70 | 0.03              | —     |    |
| 8     | Ивушка<br>n = 70                         | к.к.             | x    | 42.2             | 0.48             | 20.2                           | 3.52                           | 7.28 | 0.30 | 20.9 | 4.96 | 0.08              | 100.0 | PZ |
|       |  |                  | s    | 0.43             | 0.23             | 1.15                           | 1.67                           | 0.84 | 0.04 | 0.70 | 0.54 | 0.03              | —     |    |
| 9     | Хоркич<br>n = 149                        | к.к.             | x    | 41.3             | 0.38             | 20.0                           | 4.04                           | 7.24 | 0.33 | 20.3 | 5.64 | 0.04              | 99.3  | MZ |
|       |  |                  | s    | 0.34             | 0.17             | 0.94                           | 1.29                           | 0.79 | 0.02 | 0.51 | 0.49 | 0.01              | —     |    |
| 10    | Джерико<br>n = 11                        | ЗП               | x    | 41.4             | 0.20             | 21.1                           | 3.78                           | 8.33 | 0.38 | 19.7 | 4.69 | 0.05              | 99.6  | »  |
|       |  |                  | s    | 0.24             | 0.12             | 1.21                           | 1.64                           | 0.74 | 0.04 | 0.50 | 0.40 | 0.02              | —     |    |
| 11    | Джерико<br>n = 42                        | КП               | x    | 40.8             | 0.45             | 17.1                           | 7.89                           | 7.57 | 0.33 | 19.3 | 5.81 | 0.06              | 99.3  | »  |
|       |  |                  | s    | 0.26             | 0.13             | 1.16                           | 1.49                           | 0.41 | 0.03 | 0.40 | 0.49 | 0.02              | —     |    |
| 12    | Удачная<br>n = 30                        | ГД               | x    | 41.5             | 0.08             | 16.3                           | 9.47                           | 7.09 | 0.41 | 21.7 | 2.98 | 0.04              | 99.6  | PZ |
|       |  |                  | s    | 0.59             | 0.09             | 1.78                           | 2.27                           | 0.34 | 0.04 | 1.37 | 1.60 | 0.02              | —     |    |
| 13    | Удачная<br>n = 154                       | КП               | x    | 41.7             | 0.51             | 18.3                           | 5.38                           | 7.54 | 0.35 | 20.2 | 5.37 | 0.06              | 99.4  | »  |
|       |  |                  | s    | 0.72             | 0.32             | 2.32                           | 2.86                           | 0.97 | 0.08 | 0.97 | 0.97 | 0.02              | —     |    |

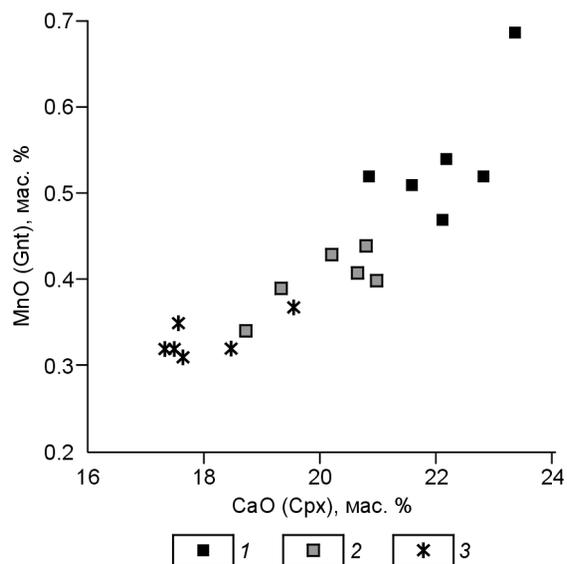
Примечание. 1, 2 — пиропы ЛАС, 3, 5 — пиропы ЛАС из ксенолитов ЗП, по [Корулова, 1999], 4 — пиропы ЛАС из современных аллювиальных отложений, 6 — пиропы ЛАС из ксенолитов ортопироксенитов; 7—9 — пиропы из различных источников без учета пиропов ЛАС: 7 — из современных аллювиальных отложений; 10—13 — пиропы из различных генетических типов пород: 10 — из ксенолитов обычных ЗП, по [Корулова et al., 1999], 11 — из ксенолитов КП, по [Корулова et al., 1999], 12 — из ксенолитов гарцбургит-дунитов, 13 — из ксенолитов КП. n — количество образцов, x — среднее значение, s — стандартное отклонение. T — время выноса пиропов на поверхность; при подсчетах не учитывались низкохромистые пиропы (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 1.0 мас.%) к.к. — кимберлитовый концентрат, шл.п. — шлиховые пробы.

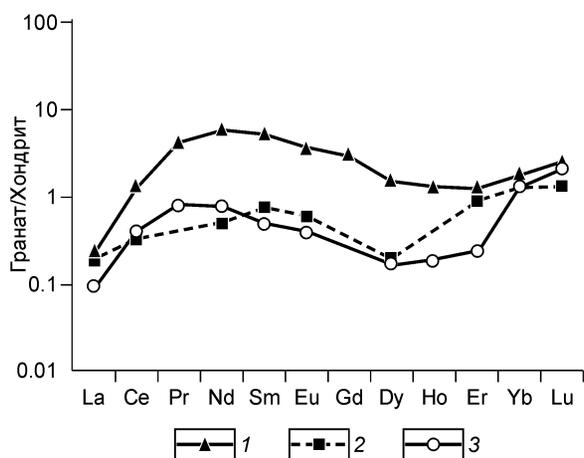
с понижением температуры (от 0.25 до 0.5 мас.% при понижении T от 1200 до 900 °С и давлениях 30 и 40 кбар). Пиропы ЛАС в подавляющем большинстве случаев содержат повышенное количество MnO (обычно >0.4 мас.%, см. табл. 1, 2), а сосуществующие клинопироксены — CaO, что без сомнения указывает на относительно низкотемпературный характер ассоциации (рис. 4).

Пониженное содержание TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O и, по литературным данным [Корулова et al., 2000; Kuligin et al., 2000], других рассеянных несовместимых элементов,

Рис. 4. Соотношение содержания MnO в гранате и CaO в сосуществующем клинопироксене из ксенолитов тр. Джерико [Корулова, 1999].

1 — из ксенолитов ЗП с пиропами ЛАС; 2 — из ксенолитов ЗП с обычными лерцолитовыми пиропами; 3 — из ксенолитов КП.





**Рис. 5. Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в пиропсах ЛАС.**

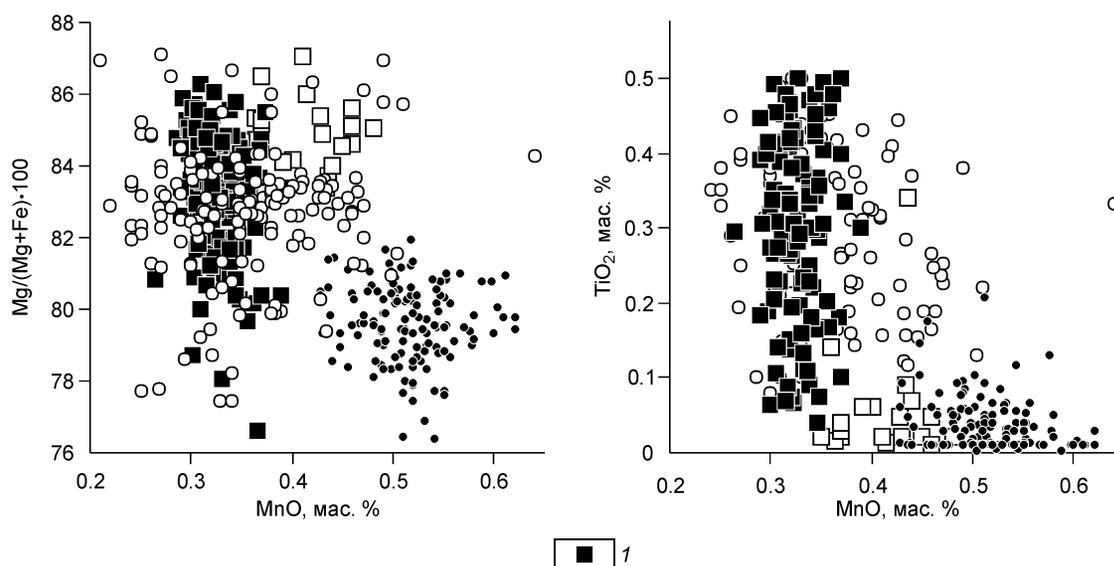
1 — ксенолит Ув-404/86, тр. Удачная [Kuligin et al., 2000]; 2 — из ксенолитов Восточно-Финской кимберлитовой провинции, усредненное значение [Peltonen et al., 1999]; 3 — из ксенолитов кимберлитов Драйбоунз Бэй, усредненное значение [Carbno, Canil, 2002].

таких как Y, Zn, Zr, Sr в пиропсах ЛАС необычно для столь обогащенных Fe и Ca разновидностей этого минерала. В пиропсах ЛАС отмечается пониженное содержание РЗЭ и характерный для истощенных лерцолитов и гарцбургитов S-образный профиль распределения РЗЭ (рис. 5) [Peltonen et al., 1999; Kuligin et al., 2000; Carbno, Canil, 2002].

**Особенности состава пиропов тр. Хоркич.** На диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ —CaO поле составов пиропов тр. Хоркич полностью перекрывается с полем составов пиропов ЛАС. Среднее содержание FeO (7.2 мас.%) в пиропсах тр. Хоркич существенно ниже, чем в среднем в пиропсах ЛАС и даже чем в пиропсах из катаклазированных перидотитов (КП). По содержанию остальных компонентов пиропы тр. Хоркич аналогичны пиропам, характерным для КП (рис. 6, см. табл. 1,2).

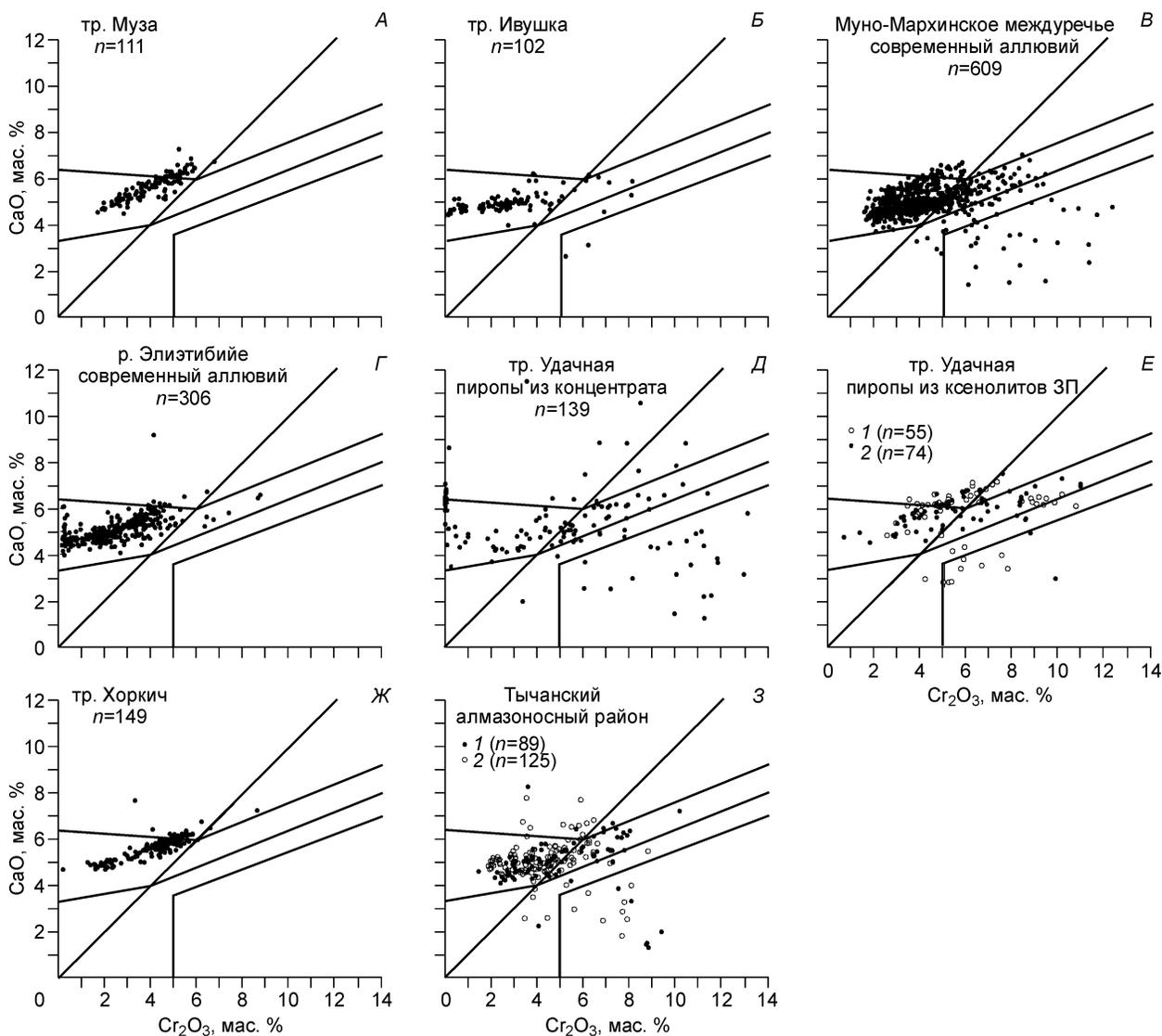
**Распространенность пиропов ЛАС.** На северо-востоке Сибирской платформы пиропы ЛАС в большом количестве содержатся в кимберлитовых трубках мезозойского ( $J_3$ ) возраста (тр. Муза, Ирина, Дьянга, Мэри, Гоби, Водораздельная и др.), в современном аллювии (р. Элиэтибийе и др.) и в существенно меньших количествах в трубках палеозойского возраста (тр. Ивушка) и нижнекарбонатовых конгломератах Кютюнндинского грабена [Соболев и др., 1981]. В центральной части платформы пиропы ЛАС обнаружены в ксенолитах из тр. Удачная ( $PZ_2$ ), а также в повышенных количествах в современном аллювии гидросети Муно-Мархинского междуречья (см. рис. 2). Пиропы ЛАС описаны и на кратоне Слэйв в кимберлитовых трубках Драйбоунз Бэй ( $PZ_1$ ) [Carbno, Canil, 2002], Джериго ( $MZ_2$ ) [Korylova et al., 1999], в пределах террейна Буффало Хэд в кимберлитах Буффало Хилз ( $MZ_3$ ) [Aulbach et al., 2004] (Канада), в пределах Балтийского щита в кимберлитах Восточно-Финской кимберлитовой провинции [Peltonen et al., 1999], в кимберлитовых трубках Северного Лесото (Южная Африка) [Nixon, Boyd, 1973]. Во всех упомянутых случаях пиропы ЛАС сохраняют все признаки группы по всем химическим характеристикам.

Для изучения распространения пиропов ЛАС на Сибирской платформе нами были изучены пиропы зернистых лерцолитов тр. Удачная, пиропы из концентрата кимберлитовых трубок Муза, Ивушка, Хоркич, из аллювиальных отложений Муно-Мархинского междуречья, а также использованы неопубликованные



**Рис. 6. Состав пиропов в координатах MnO—TiO<sub>2</sub>, MnO—Mg/(Mg + Fe)·100 тр. Хоркич (I) в сравнении с составом пиропов других парагенезисов.**

Ост. усл. обозн. см. на рис. 3.

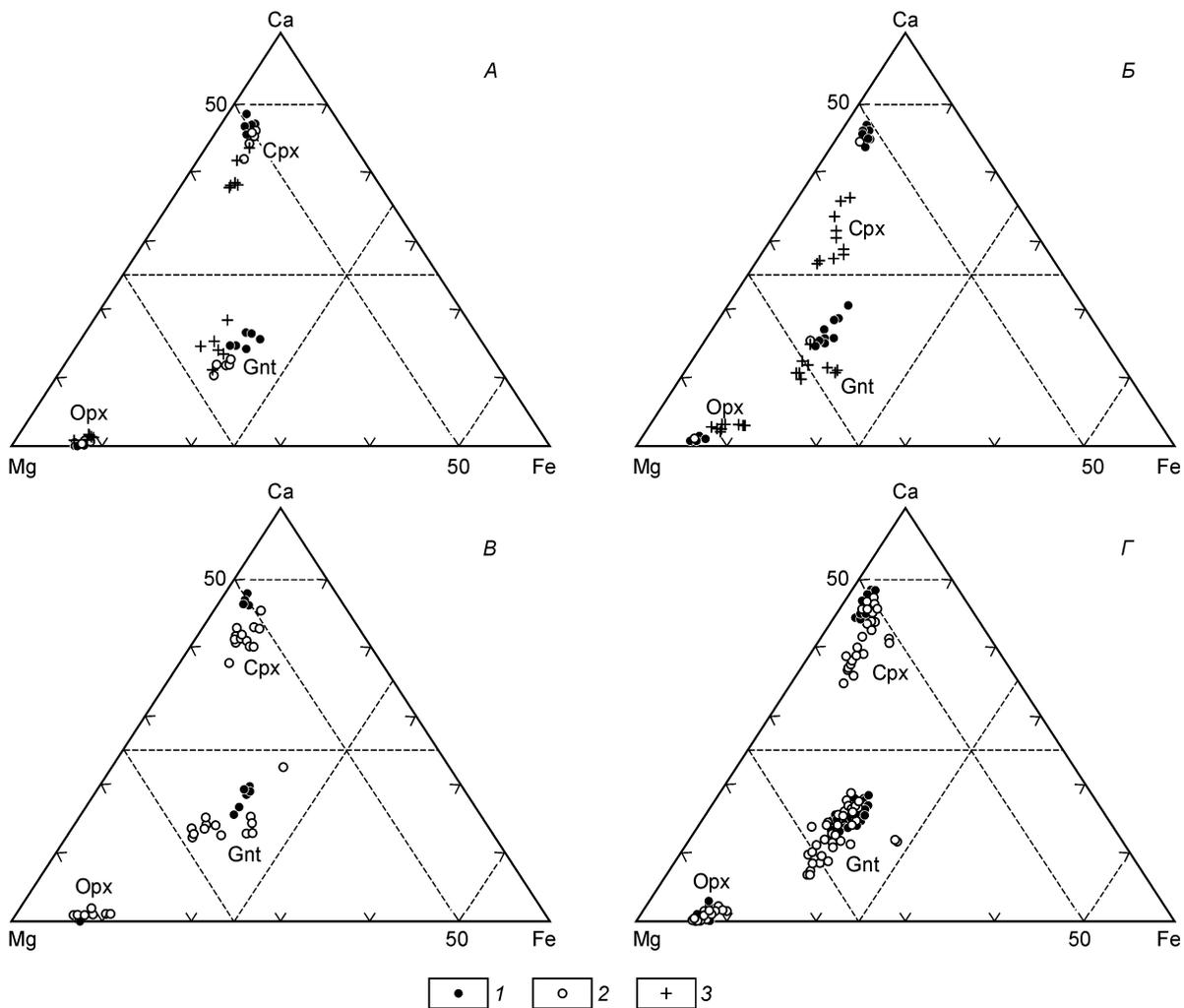


**Рис. 7.** Распределение составов пиропов на диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ — $\text{CaO}$  из кимберлитовых трубок и вторичных коллекторов Сибирской платформы.

*E:* 1 — из шпинель-пироповых ЗП, 2 — из пироповых ЗП; 3: 1 — Тычанский ореол, 2 — Тарыдакский ореол. Сплошная линия — поля составов генетических типов пиропов, по [Соколов, 1974].

ванные данные по составу пиропов из мезозойских трубок и разновозрастных вторичных коллекторов северо-востока платформы. 20 из 34 изученных нами зернистых пироповых перидотитов тр. Удачная содержат пиропы ЛАС (58.8 %). В то же время из 139 пиропов, взятых случайным образом из концентрата этой же трубки, лишь 3 относятся к типу ЛАС (2.2 %). Из 111 проанализированных пиропов тр. Муза лишь 3.6 % могут быть отнесены к группе КП, 5.4 % — к группе пиропов изначально деплетированных зернистых лерцолитов, 91.0 % — к группе пиропов ЛАС. В других мезозойских трубках района доля пиропов ЛАС составляет: тр. Ирина — 92 %, тр. Водораздельная — 39 %, тр. Гоби — 37 %, тр. Дьянга — 19 % и т. д. Из 102 проанализированных пиропов тр. Ивушка 24.6 % относятся к низкохромистым разновидностям так называемой мегахромистой ассоциации, 68.5 % — к группам пиропов ЗП и КП и лишь 6.9 % — к группе пиропов ЛАС. Из 609 проанализированных нами хромистых пиропов из современных аллювиальных отложений рек Муно-Мархинского междуречья (русло и притоки р. Тюнг) более 20 % могут быть отнесены к парагенезису ЛАС. Среди пиропов из современного аллювия р. Элизитибийе доля пиропов ЛАС составляет около 48 %. В палеозойских конгломератах этого района доля пиропов ЛАС не превышает первых процентов [Pokhilenko et al., 1999] (рис. 7).

**Характеристика пород, содержащих пиропы ЛАС.** Все без исключения породы с пиропами ЛАС относятся к равномерно-зернистым перидотитам без следов катаклаза. Количество клинопироксена чаще



**Рис. 8. Треугольные диаграммы (Ca—Fe—Mg) состава минералов из ксенолитов глубинных пород.**

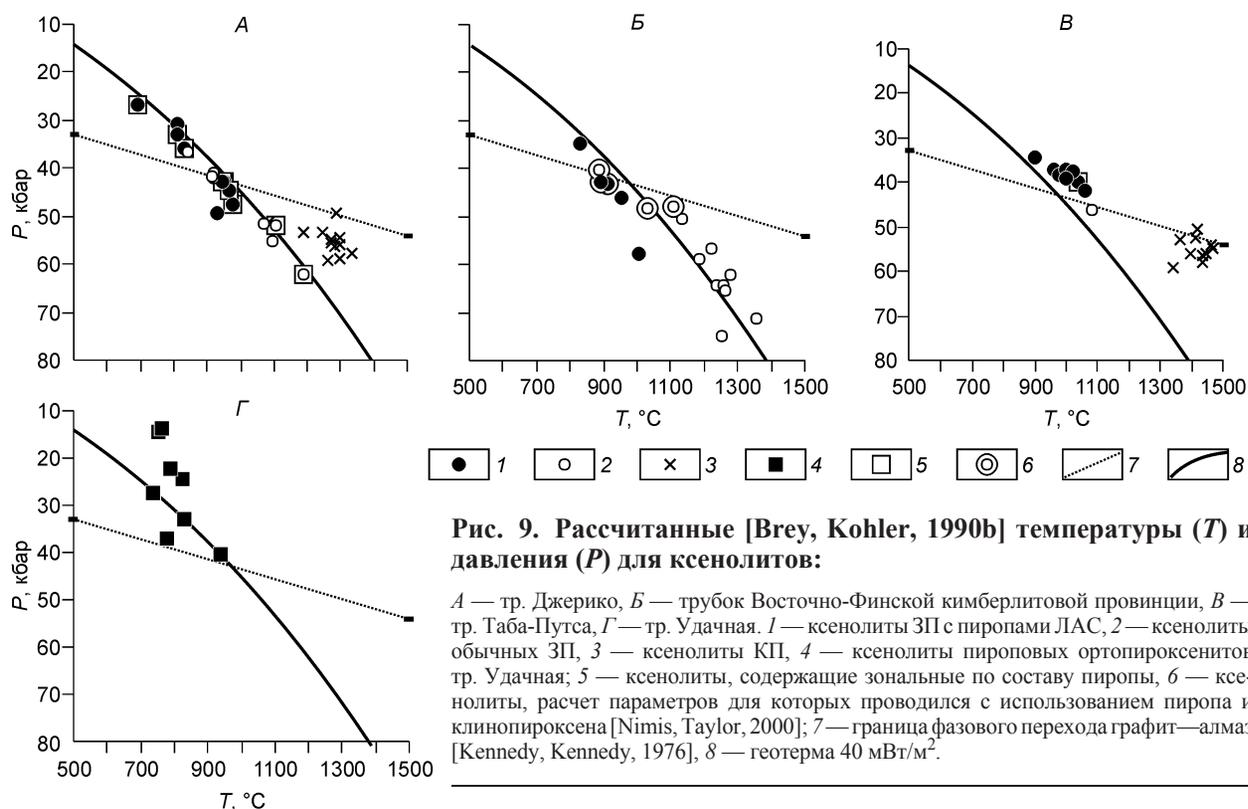
*A* — тр. Джерико, *Б* — тр. Таба-Путса, *В* — ксенолитов Восточно-Финской кимберлитовой провинции, *Г* — тр. Удачная. 1 — ЗП, содержащие пиропы ЛАС, 2 — обычные ЗП, 3 — КП.

всего понижено и не превышает по объему первых процентов (пород этого типа, не содержащих клинопироксена как фазы, не встречено). Относительно других сопутствующих мантийных ультраосновных пород по составу минералов породы, содержащие пиропы ЛАС, являются наиболее обогащенными (рис. 8). Довольно часто в породах, включающих в себя пиропы ЛАС, наблюдается неравновесность сосуществующих фаз (ксенолиты из трубок Удачная, Джерико, Таба-Путса) — существенно различный состав минералов одного вида в пределах ксенолита, зональность минералов по составу, в том числе и так называемая „обратная зональность“ в пиропе (при повышении содержания Cr от центра к кайме зерна: ксенолиты Ув-404/86 — тр. Удачная [Kuligin et al., 2000], 26-3 и 9-2 — тр. Джерико [Kopylova et al., 1999]).

На рис. 9 показаны рассчитанные [Brey, Kohler, 1990b] температуры и давления для глубинных пород из трубок, в которых обнаружены ксенолиты с пиропами ЛАС. Хотя такие породы существуют в широких пределах температуры (650—1000 °С, редко до 1100 °С) и давления (20—50 кбар, редко до 60 кбар), видно, что они в основном относятся к средним и верхним горизонтам вертикального разреза литосферной мантии.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Пиропы ЛАС на Сибирской платформе.** Кимберлитовые трубки Муза и Ивушка расположены в северо-восточной части Сибирской платформы на расстоянии 70 км друг от друга (см. рис. 2). Трубка Муза имеет возраст внедрения около 151 млн лет ( $J_3$ ) [Griffin et al., 1999], тр. Ивушка — палеозойский возраст (перекрыта толщей верхнепалеозойских терригенных пород и траппов нижнетриасового возраста [Pokhilenko, Sobolev, 1995]). Несмотря на то, что в масштабе средней мощности континентальной лито-



**Рис. 9.** Рассчитанные [Brey, Kohler, 1990b] температуры ( $T$ ) и давления ( $P$ ) для ксенолитов:

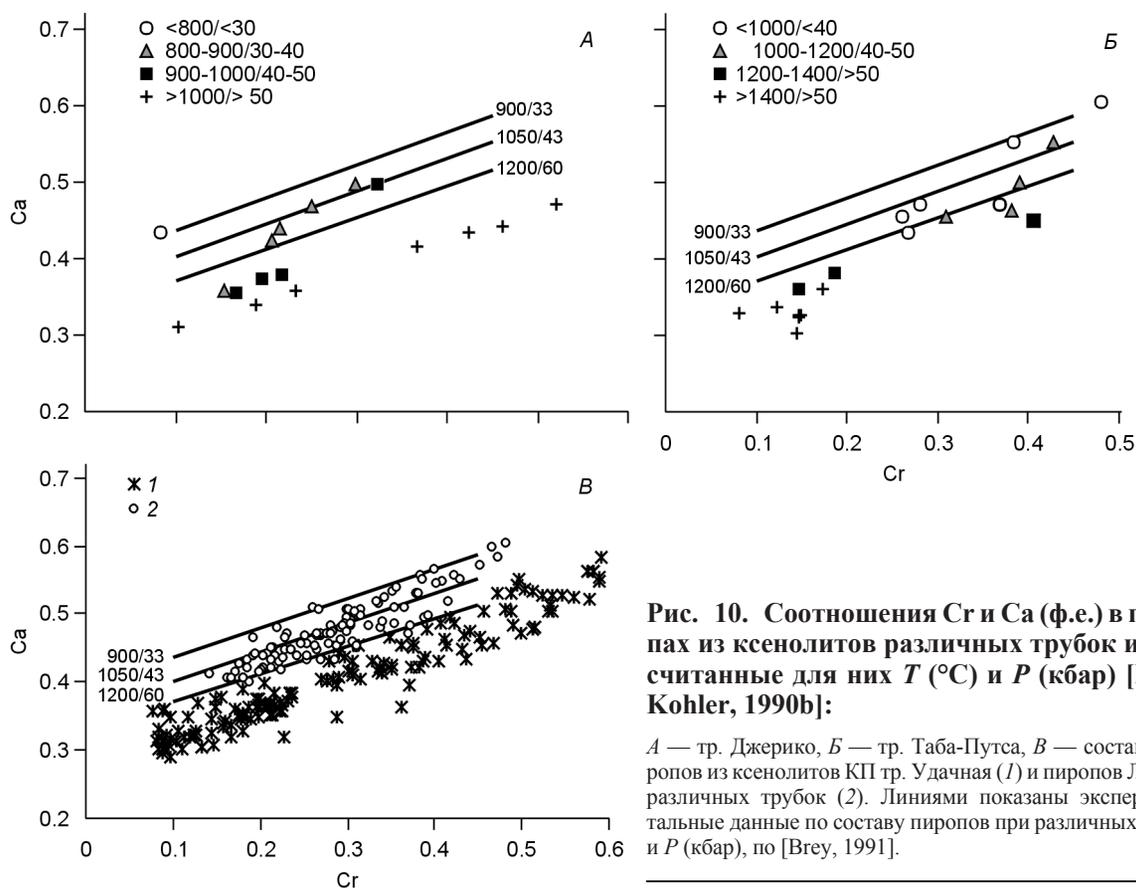
$A$  — тр. Джериго,  $B$  — трубок Восточно-Финской кимберлитовой провинции,  $B$  — тр. Таба-Путса,  $\Gamma$  — тр. Удачная. 1 — ксенолиты ЗП с пиропами ЛАС, 2 — ксенолиты обычных ЗП, 3 — ксенолиты КП, 4 — ксенолиты пироповых ортопироксенитов тр. Удачная; 5 — ксенолиты, содержащие зональные по составу пиропы, 6 — ксенолиты, расчет параметров для которых проводился с использованием пироба и клинопироксена [Nimis, Taylor, 2000]; 7 — граница фазового перехода графит—алмаз [Kennedy, Kennedy, 1976], 8 — геотерма 40 мВт/м<sup>2</sup>.

сферы эти трубки близко расположены, они существенно различаются по распределению составов пиропов из концентрата: доля пиропов ЛАС в тр. Муза существенно больше, чем в тр. Ивушка (91.0 и 6.9 %), как и в других мезозойских трубках района. Эти факты, а также то, что в палеозойских конгломератах этого района доля пиропов ЛАС не превышает первых процентов [Pokhilenko et al., 1999], указывают на существенное повышение количества пород, содержащих пиропы ЛАС, в литосферной мантии региона к мезозойскому времени относительно палеозойского.

Для мезозойской кимберлитовой тр. Хоркич, расположенной в юго-западной части Сибирской платформы на южном краю Тунгусской синеклизы, характерен тип пиропов, который по составу может быть охарактеризован как промежуточный между типом, характерным для КП, и типом ЛАС (см. „Результаты исследований“). В этом же регионе описаны вторичные коллекторы индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) палеозойского возраста (Тычанский алмазосный район, см. рис. 2) [Афанасьев и др., 2005], распределение состава пиропов из которых в целом характерно для палеозойских кимберлитов на Сибирской платформе и не выявляет существенной доли ни пиропов ЛАС, ни пиропов, характерных для мезозойских трубок района (тр. Хоркич и др.) (см. рис. 7, Ж, З). Эти данные свидетельствуют о том, что состав пород литосферной мантии этого региона также существенно изменился от палеозойского времени к мезозойскому.

Источником пиропов ЛАС, обнаруженных нами в аллювиальных отложениях центральной части Сибирской платформы, не могут быть кимберлиты из северо-восточной части платформы. Среди близлежащих кимберлитовых полей (Накынское, Алакитское, Далдынское, Верхнемунское, см. рис. 2), которые могли бы оказывать влияние на распределение составов ИМК современного аллювия этого региона, не отмечается кимберлитовых трубок, имеющих в концентрате соответствующего количества пиропов ЛАС (среднее содержание пиропов ЛАС в концентрате известных трубок центральных частей Сибирской платформы колеблется в районе первых процентов, например тр. Удачная — 2.2 %). Таким образом, относительное количество пиропов ЛАС в современном аллювии, являясь дополнительным поисковым признаком, указывает на то, что в пределах центральной части Сибирской платформы существуют до сих пор неизвестные кимберлитовые тела.

**Происхождение пиропов ЛАС.** Экспериментальные данные Ф.Р. Бойда [Boyd, 1970] говорят о том, что содержание СаО в пиробах из перидотитов зависит от парагенезиса. Так называемый лерцолитовый тренд в координатах СаО—Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образуется составами пиропов, принадлежащих лерцолитовому (либо клинопироксеносодержащему гарцбургитовому) парагенезису. Количество СаО в пиробе контролируется парой сосуществующих пироксенов и незначительно закономерно возрастает с увеличением количества в системе (и в пиробе) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

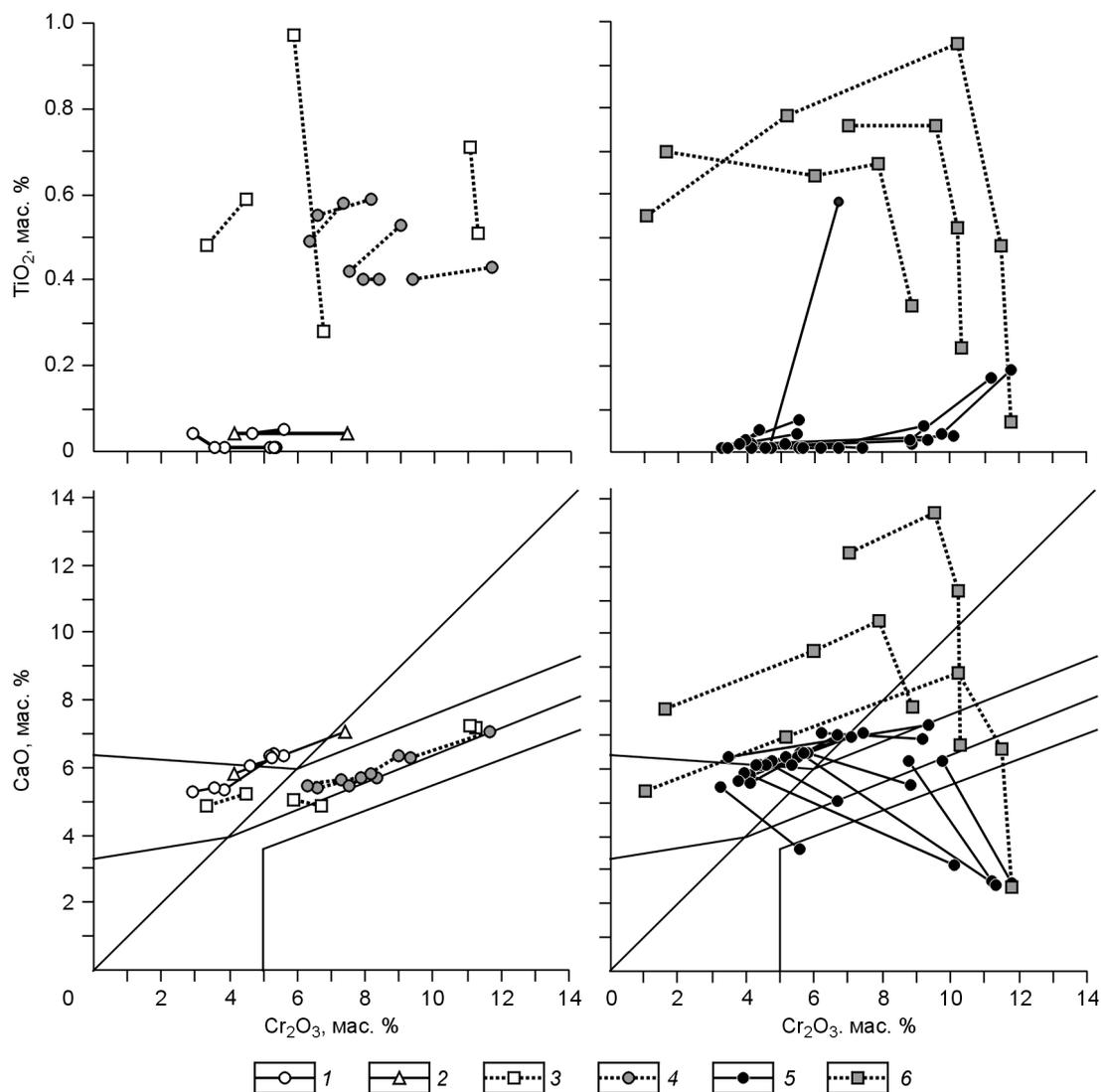


**Рис. 10. Соотношения Cr и Ca (ф.е.) в пиропе из ксенолитов различных трубок и рассчитанные для них  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и  $P$  (кбар) [Brey, Kohler, 1990b]:**

*A* — тр. Джерико, *B* — тр. Таба-Путса, *B* — составы пиропов из ксенолитов КП тр. Удачная (1) и пиропов ЛАС из различных трубок (2). Линиями показаны экспериментальные данные по составу пиропов при различных  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и  $P$  (кбар), по [Brey, 1991].

Некоторые черты состава пиропы зависят не только от состава породы, но и от  $PT$ -параметров ее существования. Об этом свидетельствуют данные экспериментов с природными системами [Brey, Kohler, 1990a]. Они показывают, что для лерцолитового парагенезиса количество  $\text{CaO}$  в пиропе, действительно находящемся в равновесии с клинопироксеном, зависит от температуры и давления. Описывая лерцолиты кратона Каапваль, Г. Брэй говорит: „соотношение  $\text{Ca—Cr}$  в пиропе указывает на то, что они не находились в равновесии с клинопироксеном, за исключением тех, которые принадлежат породам, испытывавшим на одной из стадий своей истории воздействие высокой температуры (выше, чем показывает двупироксеновый термометр сейчас), и состав пиропы в них „застыл“ в соответствии с этой температурой“ [Brey, 1991]. Таким образом, экспериментальные данные показывают, что в координатах  $\text{Ca—Cr}$  четкий линейный тренд образуют составы пиропов, принадлежащих высокотемпературным перидотитам, либо породам, испытывавшим сильный прогрев, достаточный для переуравновешивания пиропы с сосуществующим клинопироксеном. Положение тренда в этом случае зависит от температуры и давления, при которых пироп находился в равновесии с клинопироксеном. На рис. 10 показаны соотношения  $\text{Ca}$  и  $\text{Cr}$  в пиропе из нескольких трубок, содержащих пиропы ЛАС. Видна зависимость состава пиропов от температуры и давления. По причине, указанной Г. Брэйем, температура пород, рассчитанная двупироксеновым термометром, здесь, вероятно, несколько занижена по отношению к экспериментальным данным.

Изменение  $PT$ -параметров равновесия и состава породы может фиксироваться по зернам пиропов, приобретшим в результате этих процессов зональность по составу. Чаще всего зональные пиропы принадлежат КП. Описано два основных вида зональности — резкое повышение содержания  $\text{CaO}$  при незначительном понижении содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (по [Burgess, Harte, 1998] как тип III), отвечающее процессу обогащения пиропы, и зональность с незначительным понижением  $\text{CaO}$  при существенном изменении содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (по [Burgess, Harte, 1998] как тип I), отвечающая процессу эволюции состава породы при изобарическом остывании и фракционной кристаллизации пиропы [Brey, Kohler, 1990a; Smith, Boyd, 1992; Burgess, Harte, 1998] (рис. 11). Более наглядно типы зональностей проявлены в пиропе из ксенолитов ЗП тр. Удачная (обр. Ув-105/89, Ув-4/76) [Pokhilenko et al., 1999]. Они характеризуются существенным градиентом составов. Здесь одновременно проявлены оба типа зональности, закономерно сменяющие друг друга от центра зерна к кайме. Аналогичная зональность описана для пиропов из кимберлитового концентрата тр. Мир (обр. М49, М41) [Соболев, 1974] (см. рис. 11). Так, четкий тренд составов лерцолитовых пиропов на диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—CaO}$  проявляется как единое направление изменения состава пиропов в процессе их фракционной кристаллизации в определенных условиях. Этому часто



**Рис. 11.** Изменение состава пиропов на диаграммах  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$  [Соболев, 1971].

1, 2 — пиропы ЛАС из ЗП: 1 — тр. Джерико, 2 — тр. Таба-Путса; 3, 4 — пиропы из ксенолитов КП: 3 — тр. Ягерсфонтейн [Burgess, Harte, 1998], 4 — тр. Джерико [Корюлова et al., 1999]; 5 — пиропы различного состава из ксенолитов ЗП тр. Удачная (точки состава пиропов из одного образца соединены линиями); 6 — зональные пиропы из ЗП тр. Удачная (обр. Ув-105/89) и из концентрата тр. Мир (обр. М49, М41). Во всех показанных зональных пиропх содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от центра к кайме понижается. Сплошная линия — поля составов генетических типов пиропов, по [Соболев, 1974].

предшествует изменение состава пиропы от характерного для гарцбургит-дунитового и лерцолитового истощенных парагенезисов по направлению к тренду при возникновении в ассоциации клинопироксена и обогащении пиропы.

Пиропы ЛАС образуют на диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—CaO}$  четкий дискретный тренд и, очевидно, также могут образовываться в результате процесса обогащения пиропов, ранее имевших иной состав, и последующей эволюции их состава. Серьезным аргументом в пользу такого предположения является существование в пределах тренда зональных зерен пиропов [Smith, Boyd, 1992; Корюлова et al., 2000]. Изменение состава от центра зерен к кайме полностью соответствует составам незональных пиропов группы ЛАС соответствующей хромистости и может быть соотнесено с зональностью, характерной для процесса фракционной кристаллизации (см. рис. 11). В ксенолитах зернистых лерцолитов из тр. Удачная, содержащих пиропы ЛАС, описано более десятка ксенолитов зернистых гранатовых и гранат-шпинелевых лерцолитов, содержащих пиропы гомогенные внутри зерна, однако сильно отличающиеся по составу в пределах ксенолита [Малыгина, 2002]. Изменение состава пиропов ЛАС в этих ксенолитах соответствует обоим упомянутым типам зональности (см. рис. 11). Таким образом, пиропы ЛАС могут возникать в результате интенсивного прогрева пород мантии внедряющимся расплавом, образующимся при высокой степени плавления

мантийного вещества, и переуравновешивания пиропы и сосуществующих фаз при последующем остывании при относительно низком давлении. Отмеченная в ряде образцов, содержащих неравновесные минеральные фазы, обратная зональность в пиропы ЛАС [Корулова et al., 2000] также указывает на относительно низкую температуру существования парагенезиса. Экспериментальные данные по кристаллизации пиропы равновесного с двумя пироксенами в системе CMASCr ( $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—Cr}_2\text{O}_3$ ) показывают, что содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в пиропе в процессе фракционной кристаллизации при понижении температуры и постоянном давлении 30 и 40 кбар начинает возрастать от температур 1050 и 1100 °С соответственно [Smith, Boyd, 1992]. Рассчитанные [Brey, Kohler, 1990b] параметры равновесия для образцов, содержащих пиропы ЛАС с обратной зональностью, отвечают температурам 810, 830, 940 °С.

Остается неясным, насколько существенную роль при возникновении своеобразия состава пиропов ЛАС играет процесс вторичного обогащения. Возможно, оно возникает только благодаря переуравновешиванию пиропы с относительно низкотемпературным клинопироксеном. Для зональных пиропов из катаклазированных перидотитов, а также упоминавшихся нами пиропов с ярко выраженной зональностью из ЗП тр. Удачная и концентрата тр. Мир (см. рис. 11), очевидно присутствие наряду с существенным прогревом и процесса вторичного обогащения, о чем свидетельствует повышение содержания несовместимых рассеянных элементов (Ti, Y, Sr, Zr) и всего спектра РЗЭ в каймах зерен относительно центральных частей. Так как пиропы ЛАС характеризуются минимальным содержанием несовместимых рассеянных элементов и четким S-образным профилем распределения РЗЭ (см. рис. 5), характерным для истощенных перидотитов, можно предположить, что при образовании пиропов ЛАС процесс вторичного обогащения был проявлен слабо, либо отсутствовал. Роль процесса вторичного обогащения сильно зависит от состава агента, воздействующего на породы мантии, в частности, от концентрации несовместимых элементов.

М.Г. Копылова [Корулова et al., 2000] на примере пиропов из тр. Джерико указывает, что пиропы, соответствующие группе ЛАС, принадлежат шпинельсодержащим перидотитам, чем и объясняет, используя расчеты шпинель-гранатового равновесия в системе, аномальное положение тренда составов таких пиропов на диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—CaO}$ . Основным аргументом в пользу данного предположения является то, что в тр. Джерико более 90 % пиропов из ксенолитов шпинельсодержащих гранатовых перидотитов принадлежат тренду, характерному для пиропов ЛАС. Однако это правило соблюдается далеко не всегда для пиропов ЛАС из кимберлитов иных регионов, например, в тр. Удачная (см. рис. 7, E) или Буффало Хилз [Aulbach, 2004].

Н.П. Похиленко с соавторами [Pokhilenko et al., 1999] на основе сходства состава пиропов ЛАС с пиропами из пироксенитов и, в частности, по сходному положению тренда на диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—CaO}$ , предполагают генетическую связь между пироксенитами и породами, содержащими пиропы ЛАС, называя последние промежуточными по составу гибридными породами. Эта гипотеза подтверждается многочисленными находками сложных ксенолитов, содержащих лерцолиты (клинопироксенсодержащие гарцбургиты) и пироксениты в непосредственном контакте [Nixon, Boyd, 1973; Соловьева и др., 1994; Корулова et al., 1999; Kuligin et al., 2000]. Особенно богаты такими ксенолитами трубки северо-восточной части Сибирской платформы, например, тр. Обнаженная [Соболев, 1974].

В тр. Удачная, где более половины исследованных нами ЗП содержат пиропы ЛАС, обнаружены ксенолиты пироповых ортопироксенитов [Кулигин, 1997], причем слагающие их минералы по составу практически идентичны соответствующим минералам пород, содержащих пиропы ЛАС (см. табл. 2). В указанных пироксенитах, несмотря на преобладание ортопироксена, в незначительных количествах также присутствуют и остальные минералы лерцолитового парагенезиса (оливин, клинопироксен). Так как состав пиропы контролируется именно наличием в парагенезисе минеральных фаз [Boyd, 1970; Соболев, 1974], не удивительно, что состав пиропов ЛАС из лерцолитов и ортопироксенитов идентичен. С другой стороны, далеко не все пироксениты, имеющие лерцолитовый набор минералов, содержат пиропы одинакового состава. Вероятно, на состав пиропы внутри лерцолитового парагенезиса, помимо сопутствующих минеральных фаз, влияют другие факторы.

В тр. Удачная обнаружены сложные ксенолиты, в которых лерцолиты, содержащие пиропы ЛАС, находятся в непосредственном контакте с пироповыми ортопироксенитами, аналогичными упомянутым выше [Соловьева и др., 1994; Kuligin et al., 2000]. Авторы, описавшие такие ксенолиты, приходят к выводу, что их ортопироксенитовая часть образовалась в результате внедрения и последующей кристаллизации (вероятно, в виде кумулата) высокотемпературного расплава, близкого по содержанию основных компонентов к коматиитовому [Соловьева и др., 1994]. Высокотемпературный характер расплава следует из четких признаков распада высокотемпературного пироксена, сбрасывавшего при прогрессирующем остывании гранат и клинопироксен. Судя по характеру распределения рассеянных и РЗ элементов в гранатах из ортопироксенита, гранат здесь образовывался исключительно как продукт распада высокотемпературного пироксена. Геохимические исследования сложного обр. Ув-404/86 [Kuligin et al., 2000] показывают, что гранаты из ортопироксенита деплетированы по сравнению с гранатами из лерцолита по всему спектру РЗЭ, а для двух гранатов из лерцолитовой части отмечена небольшая зональность в распределении

РЗЭ с падением содержаний по всему спектру от центра к краю. Таким образом, распределение РЗЭ в краевых частях лерцолитовых гранатов приближается к таковому для гранатов ортопироксенитовой части образца, что подтверждает воздействие ортопироксенитовой части на лерцолитовую. Одинаковый состав граната и ортопироксена по главным элементам из лерцолитовой и ортопироксенитовой частей таких образцов свидетельствует о том, что минералы обеих частей были перекристаллизованы в условиях химического равновесия [Соловьева и др., 1994]. Воздействие обедненных несовместимыми рассеянными элементами ортопироксенитов может объяснить аномально низкие содержания этих элементов в минералах пород, содержащих пиропы ЛАС, характеризующихся, в общем, более обогащенным составом по главным элементам, чем обычные деплетированные перидотиты.

Итак, изложенные выше факты дают основание предполагать, что своеобразие состава пиропов ЛАС и содержащих их пород образуется в результате кристаллизации на относительно высоких уровнях мантийного разреза высокотемпературных пироксенитов, переуравновешивания состава минералов совместно с минералами вмещающих изначально деплетированных пород мантии и изменения состава последних по направлению от обычного лерцолит-гарцбургитового к пироксенитовому. На более высоких уровнях мантийного разреза, в области развития шпинелевых перидотитов, подобные процессы, вероятно, тоже имеют место. Об этом свидетельствуют многочисленные находки в сложных ксенолитах контактов между безгранатовыми породами пироксенитовой серии и шпинелевыми перидотитами [Соловьева и др., 1994], а также найденные нами неравновесные ассоциации в шпинелевых лерцолитах (ксенолиты из тр. Удачная).

Внедрение расплавов различного состава, отвечающих разным степеням плавления необедненного мантийного субстрата, приводит к возникновению в литосферной мантии многочисленных типов интрузивных пород и вторично обогащенных пород, таких как КП или породы, содержащие пиропы ЛАС. Астеносферные расплавы, из которых кристаллизуются минералы так называемой „мегакристовой ассоциации“ [Burgess, Harte, 1998], ответственны за образование в приподошвенных частях литосферы КП путем обогащения истощенных пород мантии. Они характеризуются высокими концентрациями несовместимых элементов, так как образовывались при достаточно небольших степенях плавления необедненного вещества мантии и температурах около 1200—1300 °С, характерных для подошвы литосферы [Похиленко, 1990]. Примерно таким же концентрациям несовместимых элементов, степеням плавления и температурам, вероятно, соответствуют и некоторые из расплавов, воздействующих на мантийные породы более высоких уровней разреза — зернистые перидотиты (ксенолиты таких обогащенных пород из тр. Удачная описаны Н.П. Похиленко с соавторами [Pokhilenko et al., 1999, 2002], см. рис. 11) и кристаллизующихся в виде обогащенных типов пироксенитов (клинопироксениты, вебстериты). Расплавы, отвечающие более высоким температурам (1300—1500 °С) и образующиеся при более высоких степенях плавления мантийного вещества, содержат несовместимые элементы в существенно меньшем количестве. Их можно соотнести с присутствующими на разных уровнях разреза литосферной мантии интрузивными ортопироксенитами и оливиновыми вебстеритами. Вероятно, поднимаясь до глубин 60 км и даже выше, такие расплавы воздействуют на вмещающие породы и образуют, как показано выше, перидотиты, содержащие пиропы ЛАС. Такие необычно высокие для подошвы литосферы температуры и степени плавления, очевидно, должны отвечать некоторой тектонотермальной активизации низов литосферы.

Проведенные нами исследования, а также литературные данные [Похиленко, 1990; Pokhilenko, Sobolev, 1995; Похиленко, Соболев, 1998; Pokhilenko et al., 1999, 2002] свидетельствуют о существенном увеличении роли пород, характеризующихся пиропами ЛАС в мантийном разрезе северо-восточной части Сибирской платформы от верхнепалеозойского времени к среднемезозойскому. Это согласуется с данными о существенно повышенной доле ксенолитов пироксенитов в ряде мезозойских трубок этого района, что подчеркивалось ранее [Соболев и др., 1978].

Уменьшение мощности литосферы в этом регионе от верхнепалеозойского времени к мезозойскому фиксируется по максимальным *PT*-параметрам существования мантийных пород из ксенолитов разновозрастных трубок [Соболев, 1974] и пиропов из концентрата, а также по существенному повышению теплового потока (37—41 мВт/м<sup>2</sup>) [Похиленко, Соболев, 1998]. Оно могло происходить, например, по механизму, предложенному Д.А. Йеном и Л. Флето [Yuen, Fleitout, 1985], в соответствии с которым нижние части литосферы эродируются посредством мелкомасштабной конвекции в голове поднимающегося мантийного плюма.

Учитывая предполагаемое происхождение пиропов ЛАС и то, что пределы их существования в мантии по глубине не превышают 170 км, можно говорить, что существенное повышение их количества в концентрате кимберлитовых трубок северо-восточной части Сибирской платформы от верхнепалеозойского времени к мезозойскому является следствием двух факторов — существенного повышения количества пироксенитов в мантийном разрезе и уменьшения мощности литосферной мантии примерно от 180—230 до 130—150 км. Оба эти события могут быть связаны с тектонотермальной активизацией литосферы Сибирской платформы в период времени между верхнепалеозойским и среднемезозойским циклами кимберлитового магматизма, которая выразилась на поверхности в виде масштабных излияний

траппов в пермотриасовое время и связывается большинством авторов [Renne, Basu, 1991; Sheth, 1999; Добрецов, 2005; и др.] с воздействием на низы литосферной мантии Сибирского суперплюма.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности состава пиропов различных типов, описанных в работе, возникают при воздействии на породы вертикального разреза литосферной мантии поднимающихся астеносферных расплавов, характеризующихся различными концентрациями несовместимых элементов.

Характерный состав пиропов ЛАС отражает их принадлежность к лерцолитовому парагенезису (т.е. сосуществование с оливином, ортопироксеном и клинопироксеном) и характерные *PT*-условия существования этого парагенезиса. Ряд факторов указывает на то, что могут возникать пиропы ЛАС в результате воздействия расплавов, отвечающих высоким степеням плавления необедненного мантийного вещества, на породы верхних частей мантийного разреза, включая, вероятно, и горизонты, где развиты шпинелевые перидотиты. Так как пиропы ЛАС существуют в мантии в ограниченных пределах температуры и давления, их преобладание в концентрате ряда кимберлитовых трубок говорит о том, что мощность литосферы, опробуемой этими трубками, вероятнее всего, не превышает 170 км.

На Сибирской платформе пиропы ЛАС встречаются как в кимберлитах палеозойского, так и мезозойского возрастов. Однако в существенных концентрациях пиропы ЛАС встречены только в кимберлитовых телах мезозойского возраста в местах проявления траппового магматизма (с.-в. часть платформы). Этот факт — одно из свидетельств того, что в большом количестве пиропы ЛАС на Сибирской платформе могли возникнуть в связи с воздействием на литосферную мантию Сибирского суперплюма (Р-Т). Пиропы ЛАС, выносимые в незначительных количествах на поверхность кимберлитами палеозойского возраста на Сибирской платформе, отражают аналогичные процессы обогащения вещества литосферной мантии, происходившие в палеозойское время в существенно меньших масштабах.

Повышенное количество пиропов ЛАС в аллювиальных отложениях Муно-Мархинского междуречья дает основание предполагать, что в центральной части платформы могут существовать не известные до сих пор кимберлитовые тела мезозойского возраста.

Существенное изменение состава пиропов из кимберлитов в различных частях Сибирской платформы (северо-восточной, юго-западной, возможно, центральной) от палеозойского времени к мезозойскому указывает на то, что воздействие пермотриасового плюма привело к существенному изменению состава и строения литосферной мантии Сибирской платформы в различных ее частях.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Афанасьев В.П., Гриффин В.Л., Натапов Л.М., Зинчук Н.Н., Матухин Г.Р., Мкртычян Г.А.** О перспективах алмазоносности юго-западного фланга Тунгусской синеклизы // Геология рудных месторождений, 2005, т. 47, № 1, с. 51—69.

**Брахфогель Ф.Ф.** Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1984, 128 с.

**Добрецов Н.Л.** Разномасштабные проявления плюм-базальтового и плюм-кимберлитового магматизма и их вероятные модели // Эволюция континентальной литосферы, происхождение алмазов и их месторождений (Тез. докл. Междунар. симпоз., Новосибирск, 3—5 июня 2005 г.). Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2005, с. 32.

**Кулигин С.С.** Комплекс ксенолитов пироксенитов из кимберлитов различных регионов Сибирской платформы: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, ИМП СО РАН, 1997, 29 с.

**Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамэн Л.М., Брахфогель Ф.Ф., Спецрус З.В.** Определение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрохимическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 91—99.

**Малыгина Е.В.** Минералогия ксенолитов зернистых перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная в связи с проблемой состава верхней мантии Сибирской платформы: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, ИМП СО РАН, 2002, 21 с.

**Похиленко Н.П.** Мантийные парагенезисы в кимберлитах, их происхождение и поисковое значение: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1990, 44 с.

**Похиленко Н.П., Соболев Н.В.** Некоторые аспекты эволюции литосферной мантии северо-восточной части Сибирской платформы в связи с проблемой алмазоносности разновозрастных кимберлитов // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов (Материалы науч.-практ. конф.). Мирный, 1998, с. 65—67.

**Соболев Н.В.** Минералогические критерии алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика, 1971 (3), с. 70—80.

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

**Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В.** Роль хрома в гранатах из кимберлитов // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1978, с. 145—168. (Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 403).

**Соболев Н.В., Белик Ю.П., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Кривонос В.Ф., Поляков В.Н., Соболев В.С.** Хромсодержащие пиропы в нижнекаменноугольных отложениях Кютюндинского прогиба // Геология и геофизика, 1981 (2), с. 153—156.

**Соловьева Л.В., Владимиров Б.М., Днепровская Л.В.** Кимберлиты и кимберлитоподобные породы. Вещество верхней мантии под древними платформами. Новосибирск, Наука, 1994, 256 с.

**Тычков Н.С.** Эволюция состава и строения литосферной мантии северо-восточной части Сибирской платформы по минералам глубинных парагенезисов // Эволюция тектонических процессов в истории Земли (материалы молодежной школы-конференции XXXVII тектонического совещания, 20—22 апреля 2004 г.). М., ГЕОС, 2004а, с. 93—96.

**Тычков Н.С.** Распределение пиропов различных парагенезисов в разновозрастных кимберлитах северо-восточной части Сибирской платформы: свидетельства эволюции состава и строения литосферной мантии // Материалы XLII международной научной студенческой конференции (13—15 апреля 2004 г.). Новосибирск, 2004б.

**Тычков Н.С.** Особенности состава и происхождения лерцолитов аномального состава (свидетельства эволюции литосферной мантии С-В Сибирской платформы) // Геология, петрология, минералогия и генезис щелочных пород: материалы всероссийского совещания. Миасс, ИМин УрО РАН, 2006а, с. 260—264.

**Тычков Н.С.** Эволюция состава и строения литосферной мантии северо-восточной части Сибирской платформы по минералам глубинных парагенезисов // Материалы III международной сибирской конференции молодых ученых по наукам о земле (27—29 ноября 2006 г.). Новосибирск, ИГМ и ИНГГ СО РАН, 2006б.

**Тычков Н.С., Похиленко Н.П., Малыгина Е.В.** Пиропы аномального состава из лерцолитов, особенности состава и происхождение // Материалы II международной конференции „Кристаллогенезис и минералогия“ (1—5 окт. 2007 г.). СПб., СПбГУ, 2007, с. 360—363.

**Aulbach S., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., McCandless T.E.** Genesis and evolution of the lithospheric mantle beneath the Buffalo Head Terrane, Alberta (Canada) // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 413—451.

**Boyd F.R.** Garnet peridotites in the system  $\text{CaSiO}_3\text{—MgSiO}_3\text{—Al}_2\text{O}_3$  // *Miner. Soc. Amer. Special Paper*, 1970, v. 3, p. 63—75.

**Brey G.** Fictive conductive geotherms beneath the Kaapvaal craton // 5th Inter. Kimb. Conf., CPRM-Spec. Publ., Araxa, Brazil, Ext. abstracts, 1991, p. 23—25.

**Brey G.P., Kohler T.** Geothermobarometry in four phase lherzolites I: experimental results from 10 to 60 kb // *J. Petrol.*, 1990a, v. 31, p. 1313—1352.

**Brey G.P., Kohler T.** Geothermobarometry in four phase lherzolites II: new thermobarometers and practical assessment of using thermobarometers // *J. Petrol.*, 1990b, v. 31, p. 1353—1378.

**Burgess S.R., Harte B.** Tracing lithosphere evolution through the analysis of heterogeneous G9/G10 garnets in peridotite xenoliths, I: major element chemistry // *Proc. 7th Inter. Kimb. Conf.*, Cape Town, 1998, v. 1, p. 66—80.

**Carbno G.B., Canil D.** Mantle structure beneath the south-west Slave craton, Canada: constraints from garnet geochemistry in the Drybones Bay kimberlite // *J. Petrol.*, 2002, v. 43, p. 129—142.

**Davis B.T.C., Boyd F.R.** The join  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6\text{—CaMgSi}_2\text{O}_6$  at 30 kilobars pressure and its application to pyroxenes from kimberlites // *J. Geophys. Res.*, 1996, v. 71, p. 3567—3576.

**Delaney J. S., Smith J.V., Dawson J.B., Nixon P.H.** Manganese thermometer for mantle peridotites // *Contr. Miner. Petrol.*, 1979, v. 71, № 2, p. 157—169.

**Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminskaya F.V., O'Reilly S.Y., Natapova L.M., Winb T.T., Kinnyd P.D., Pupin I.P.** The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // *Tectonophysics*, 1999, v. 310, p. 1—35.

**Kennedy C.S., Kennedy G.C.** The equilibrium boundary between granite and diamond // *J. Geophys. Res.*, 1976, v. 81, Iss. B14, p. 2467—2470.

**Kopylova M.G., Russell J.K., Cookenboo H.** Petrology of peridotite and pyroxenite xenoliths from the Jericho kimberlite: implications for the thermal state of the mantle beneath the Slave Craton, northern Canada // *J. Petrol.*, 1999, v. 40, p. 79—104.

**Kopylova M.G., Russell J.K., Stanley C., Cookenboo H.** Garnet from Cr- and Ca-saturated mantle: implications for diamond exploration // *J. Geochem. Explor.*, 2000, v. 68, p. 183—199.

**Kuligin S.S., Malkovets V., Pokhilenko N.P., Vavilov M., Griffin W., O'Reilly S.** Mineralogical and geochemical characteristic of a unique mantle xenolith from the Udachnaya kimberlite pipe // 8th Int. Kimb. Conf., Victoria, Ext. abstr., 2000.

**Nimis P., Taylor W.R.** Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Pt I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // Contr. Miner. Petrol., 2000, v. 139, № 5, p. 541—554.

**Nixon P.H., Boyd F.R.** Lesotho kimberlites. Lesotho National Develop. Corp., Maseru, 1973, 305 p.

**Peltonen P., Huhma H., Tyni M., Shimizu N.** Garnet peridotite xenoliths from kimberlites of Finland: nature of the continental mantle at an Archaean craton — Proterozoic mobile belt transition // Proc. 7th Int. Kimb. Conf., Cape Town, 1999, p. 664—676.

**Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Mineralogical mapping of the northeast section of the Yakutian kimberlite province and its main results // 6th Int. Kimb. Conf., Novosibirsk, Ext. abstr., 1995, p. 446—448.

**Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N.** Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnet in Yakutian kimberlites and some aspects of the Siberian craton lithospheric mantle // Proc. 7th Int. Kimb. Conf., Cape Town, 1999, v. 2, p. 689—698.

**Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Agashev A.M., Shimizu N.** Permo-Triassic superplume and its influence to the Siberian lithospheric mantle // Superplume Workshop, Tokyo, Ext. abstr., 2002, p. 249—252.

**Renne P.R., Basu A.R.** Rapid eruption of the Siberian trap flood basalts at the Permo-Triassic boundary // Science, 1991, v. 253, № 5016, p. 176—179.

**Ryan C.J., Griffin W.L., Pearson N.** Garnet geotherms: a technique for derivation of *P-T* data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks // J. J. Res., 1996, v. 101, p. 5611—5625.

**Sheth H.C.** A historical approach to continental flood basalt volcanism: insights into pre-volcanic rifting, sedimentation, and early alkaline magmatism // Earth Planet. Sci. Lett., 1999, v. 168, p. 19—26.

**Smith D., Boyd F.R.** Composition zonation in garnets in peridotite xenolith // Contr. Miner. Petrol., 1992, v. 112, p. 134—147.

**Yuen D.A., Fleitout L.** Thinning of the lithosphere by small-scale convective destabilization // Nature, 1985, v. 313, № 5998, p. 125—128.

*Рекомендована к печати 16 ноября 2007 г.  
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию 16 апреля 2007 г.,  
после доработки — 15 ноября 2007 г.*