

## ХРОМШПИНЕЛИДЫ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ СЕВЕРНОГО КИТАЯ (ХУАБЭЙ)

### Summary

The macrokrystes of chromites and microkrystalline oxides from China kimberlites (Mengyin and Fuxian regions) were investigated. The data were compared with Arkhangesk kimberlites of Russia. It was established that the high-Cr chromites were abundant and formed first, whereas ilmenites are rare. As for magnetites and perovskites they are also abundant and formed at the final stages.

**Введение.** Исследование индикаторных минералов кимберлитов имеет большое практическое и научное значение: во-первых, это минералы - спутники алмазов, а, во-вторых, это главный источник сведений о строении мантийных глубин Земли. Именно поэтому их изучению посвящено много работ. Лучше всего изучена минералогия кимберлитов Ю. Африки (Доусон, 1983; Mitchell, 1995; Haggerty, 1975) и Якутии (Соболев, 1974; Ваганов, 2002; Харьков и др., 1989). Кимберлиты Китая открыты в 1966 г. Эти объекты изучали в различных геологических организациях КНР, однако обобщающих минералогических работ мало [Бао Яньнань, 1991; Лу Фэнсян, 1996]. В них не было проведено анализа типохимизма индикаторных минералов и микрокристаллических оксидов из связующей массы для кимберлитов Китая на основе их единой химико-генетической классификации. Цель данной работы — выявление минералогических и генетических особенностей хромшпинелидов из кимберлитов Северного Китая (Хуабэй), исследование типоморфизма хромшпинелидов в алмазоносных и неалмазоносных кимберлитовых трубках Северного Китая и сравнение их с кимберлитами других регионов. В работе впервые для кимберлитов Китая применён методический подход, разработанный в проблемной лаборатории месторождений алмаза геологического факультета МГУ, успешно использованный в

других районах Мира. В качестве модельного объекта для сопоставительных исследований выбрана Архангельская алмазоносная провинция, на объектах которой эта методика была применена наиболее полно и успешно (Богатилов и др., 1999).

Были изучены образцы кимберлитов из нескольких алмазоносных трубок: Победа – 1, Красный флаг № 6 и № 28 (район Мэн Инь), трубки № 42 и 50 (район Фусянь). Проводились минералого-петрографические исследования образцов из кимберлитов Хуабэй (более 45), а также электронно-микроскопические и электронно-зондовые исследования хромшпинелидов (127 ан.). Фазовый и химический состав микрокристаллических оксидов из связующей массы кимберлитов был изучен методами термического анализа, ИК-спектроскопии, количественного и качественного рентгенофазовых анализов; электронно-зондового анализа (71 ан.).

### **Геолого-петрографическая характеристика кимберлитов Китая**

На территории КНР основные коренные месторождения алмаза обнаружены на Северо-Китайской платформе (Хуабэй). Проявления кимберлитов известны в пределах Шаньдунского и Ляодунского щитов [Гринсон, 1984]. В пределах платформы Хуабэй выделяют две кимберлитовые провинции и 9 кимберлитовых районов (Рис. 1). Они включают 9 кимберлитовых групп: Мэн Инь, Фусянь, Телин, Хуаньжэнь, Хэби, Шэсянь, Люлин, Инсянь, Янгао [Каминский, 1988]. Кимберлиты представлены трубками, дайками и силлами. Кимберлитовые районы Мэн Инь (провинция Шандун) и Фусянь (провинция Ляонин) — главные плутогенные месторождения алмаза в Китае. Для исследований были выбраны четыре главных месторождения из этих провинций.

- Трубка Победа 1 «Шенгли» (район Мэн Инь) - высокоалмазоносная. Состоит из двух тел, сливающихся на глубине. Трубка сложена крупнокристаллическим порфировым кимберлитом, с малым содержанием флогопита.

- Трубка Красный флаг № 6 (район Мэн Инь) – среднеалмазоносная, самая большая по площади в районе Мэн Инь. Породы – крупнокристаллический порфировый кимберлит, алмазоносный и флогопитовый кимберлит.
- Трубка № 50 «Бинхай» (район Фусянь) - высокоалмазоносная. Породы – крупнокристаллические порфировые кимберлиты, кимберлитовые туфобрекчии и крупнокристаллические порфировые кимберлитовые брекчии, выявлено 4 магматических фазы.
- Трубка № 42 (район Фусянь) - среднеалмазоносная. Состоит из трёх тел. Породы – крупнокристаллические порфировые флогопитовые кимберлиты, шарообразные крупнокристаллические порфировые кимберлиты и крупнокристаллические кимберлитовые туфобрекчии, установлено 4 фазы внедрения.

### **Мантийные ксенокристы хромшпинелидов в кимберлитах Хуабэй**

Основные сведения о мантийных условиях образования кимберлитов можно получить по результатам изучения индикаторных минералов кимберлитов, в том числе хромшпинелидов из алмазоносных и неалмазоносных трубок. Из литературы известно (Бао Яньнань, 1991; Лу Фэнсян, 1996), что хромшпинелиды в кимберлитах Китая содержатся в повышенных количествах. В рамках данной работы был изучен фазовый и химический состав хромшпинелидов из трубок № 42 и 50. Для изучения были отобраны зерна крупнее 1 мм (макрозерна). Было проведено изучение их состава и собраны все опубликованные данные для этих минералов из других объектов Хуабэй. Парагенетическая принадлежность хромшпинелидов устанавливалась с применением методов кластерного и дискриминантного анализов, на основе химико-генетической

классификации (ХГК), разработанной в МГУ (Богатиков и др., 1999).

В результате статистической обработки среди проанализированных хромшпинелидов (15 обр.) выделено только 2 химико-генетические группы. 3 анализа (14%) отнесены 3-ей группе по ХГК - *лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки*. Эти хромшпинелиды характеризуются средними содержаниями  $MgO$ —10,91 мас.%,  $Al_2O_3$ —4,18 мас.%,  $TiO_2$ —1,01 мас.%,  $Cr_2O_3$ —62,41 мас.%,  $FeO$ —16,33 мас.%.  $Fe_2O_3$ —4,01 мас.%. Для них характерно высокое содержание  $Cr_2O_3$  — в среднем 62,41 мас.%. 18 анализов (85%) отнесены к 12-ой группе по ХГК – *парагенезис с зональными гранатами*. Эта группа отличается низким содержанием  $Cr_2O_3$  (0-1,96 мас.%) и высоким содержанием железа: 36,17-46,38 мас.%  $FeO$ , 39,64-52,79 мас.%  $Fe_2O_3$ . К этой группе отнесены магнетиты, которые, скорее всего, являются вторичными и образуются при серпентинизации оливина. Главная особенность всех изученных хромшпинелидов — низкие содержания титана, включая вторичные магнетиты. Чтобы более полно охарактеризовать состав хромшпинелидов, мы обработали результаты предыдущих исследований их химического состава (127 ан.) для алмазоносных кимберлитов провинций Шандун, Ляонин и других неалмазоносных провинций.

**Кимберлитовая провинция Шандун.** В результате статистической обработки для хромшпинелидов из кимберлитов Шандун (37 ан.) выделены 1, 2, 3 и 10 химико-генетические группы. 1-ая группа по ХГК (10 ан.) - *высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты* (включения в алмазе). Вариации  $Cr_2O_3$  для минерала этой группы составляют 60,77—66,54 мас.%,  $Al_2O_3$  от 8,76 до 12,98 мас.%,  $Fe_2O_3$  от 2,1 до 6,22 мас.% и  $FeO$  от 12,86 до 18,81 мас.%. Содержание  $TiO_2$  незначительно: 0,12—2,70 мас.%. 2-ая группа по ХГК (2 ан.) - *алмазоносные гарцбургиты с высокохромистым шпинелидом*. Для них характерно чуть более высокое содержание  $MgO$  (в среднем

19,08 мас.%) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (в среднем 13,88 мас.%), более низкое содержание  $\text{FeO}$  (9,19 мас.%), содержания  $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$  и  $\text{Cr}$  не сильно отличаются от хромшпинелидов из 1 ХГК. В провинции Ляонин такие хромшпинелиды не установлены. 3-ая группа по ХГК (14 ан.) - *лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки*. Отличается от предыдущих групп более низким содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (55,53—60,54 мас.%), несколько большим количествами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,99—13,66 мас.%) и повышенным содержанием  $\text{FeO}$  (14,63—18,57 мас.%). 10-ая группа по ХГК (11 ан.) - *гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты*. Отличаются ещё более низким содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (50,18—57,54 мас.%) и более высоким содержанием  $\text{TiO}_2$  (2,83—4,35 мас.%). Диаграммы (рис. 2) показывают, что среди шпинелидов Шандун много высокохромистых разновидностей из алмазоносных парагенезисов и что высокохромистые шпинелиды обогащены титаном.

**Кимберлитовая провинция Ляонин.** В результате статистической обработки для хромшпинелидов из кимберлитов Ляонин (67 ан.) выделено 7 химико-генетических групп. 1-ая группа по ХГК, 15 анализов отнесены к этой группе: *высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты* (включения в алмазе). Вариации  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  для минерала этой группы составляют 61,77—65,81 мас.%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 0,06—8,12 мас.%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 0,54—4,97 мас.% и  $\text{FeO}$  - 12,33—16,43 мас.%. Содержание  $\text{TiO}_2$  в этом минерале незначительно: 0,01—1,06 мас.%. 3-ая группа по ХГК, 11 анализов отнесены к этой группе: *лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки*. Для них характерно чуть более высокое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (в среднем 9,33) и  $\text{TiO}_2$  (в среднем 1,46), более низкое содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (в среднем 55,94). Содержания  $\text{MgO}$  (в среднем 11,49 мас.%) не сильно отличаются от хромшпинелидов из первой группы. Несколько больше  $\text{FeO}$  (в среднем 16,60) и повышенные содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (в среднем 4,75). 4-ая группа по ХГК, 7 анализов отнесены к этой группе: *лерцолиты с среднехромистым*

*шпинелидом*. Они отличаются от предыдущих групп наиболее низким содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (44,17—50,42 мас.%) и более высоким содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14,6—19,4 мас.%). Содержания  $\text{MgO}$  (в среднем 12,93 мас.%),  $\text{TiO}_2$  (в среднем 0,48 мас.%) и железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  2,33—5,94 мас.%;  $\text{FeO}$  12,35—22,05 мас.%) не сильно отличаются от хромшпинелидов из 1 и 3 групп. Эта группа в провинции Шандун не установлена. 10-ая группа по ХГК, 6 анализов отнесены к этой группе: *гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты*. Для этих хромшпинелидов характерно чуть более высокое содержание  $\text{TiO}_2$  (1,97—4,41 мас.%) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (8,48—11,37 мас.%). 11-ая группа по ХГК, 4 анализа отнесено к этой группе - *катаклазированные лерцолиты*. Эти шпинелиды имеют довольно высокие концентрации  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (46,78—52,8 мас.%) и характеризуются повышенными содержаниями  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (от 10,74 до 17,5 мас.%) и  $\text{TiO}_2$  (4,3—6,73 мас.%). Минералы этой и следующей группы в провинции Шандун не установлены. 12-ая группа по ХГК, 20 анализов отнесены к этой группе - *зональные гранаты*. Эта группа очень сильно отличается от предыдущих: очень низкое содержание хрома (0—1,96 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), очень высокое содержание двухвалентного и трехвалентного железа ( $\text{FeO}$  28,99—46,38 мас.%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  39,64—52,79 мас.%). 4 анализа всех изученных зерен не могут быть строго отнесены ни к одной из выделенных химико-генетических групп. Эти шпинелиды характеризуются содержаниями:  $\text{MgO}$  - 0,41—17,3 мас.%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 0,49—3,98 мас.%,  $\text{TiO}_2$  - 9,15—63,79 мас.%,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  - 0,17—33,25 мас.%,  $\text{FeO}$  - 7,19—19,51 мас.% и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 8,24—34,53 мас.%.

**Другие (неалмазоносные) кимберлитовые провинции Хуабэй.** В этих кимберлитах установлено пять основных химико-генетических групп хромшпинелидов. 3-ая группа по ХГК, только 5 анализов отнесены к этой группе - *лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки*. Вариации  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  для минерала этой группы составляют 51,51—60,29 мас.%,

$\text{Al}_2\text{O}_3$  от 6,66 до 16,03 мас.%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  от 0,96 до 6,92 мас.% и  $\text{FeO}$  от 15,25 до 26,06 мас.%. Содержание  $\text{TiO}_2$  в этом минерале незначительно: 0,02—2,75 мас.%. 4-ая группа по ХГК, 4 анализа отнесено к этой группе - *лерцолиты со среднехромистым шпинелидом*. Для них характерно чуть более низкое содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (42,43—49,76 мас.%), более высокое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14,56—25,02 мас.%) и  $\text{MgO}$  (5,29—15,55 мас.%). 5-ая группа по ХГК, 6 анализов отнесены к этой группе - *лерцолиты с среднехромистым шпинелидом*. Они сильно отличаются от предыдущих хромшпинелидов: наиболее высокое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (27,75—34,79 мас.%) и  $\text{MgO}$  (11,94—15,52 мас.%), наиболее низкое содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (31,67 — 41,58 мас.%). Небольшое изменение  $\text{TiO}_2$  (0,05—0,36 мас.%) и железа: 0—2,84 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 12,68—17,7 мас.%  $\text{FeO}$ . Эта группа в провинциях Шандун и Ляонин не установлена. 6-ая группа по ХГК, 3 анализа отнесено к этой группе - *гранатовые вебстериты и гарцбургиты с низкохромистым шпинелидом*. Их отличительные особенности — высокая глиноземистость (41,44—43,02 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и, соответственно, пониженное содержание хрома (24,87—25,14 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); титана практически нет (0,00—0,40 мас.%  $\text{TiO}_2$ ); очень мало трехвалентного железа (0,81—0,87 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), а содержания закисного железа варьируют от 11,09 до 11,88 мас.%  $\text{FeO}$ . Эта группа в провинциях Шандун и Ляонин также не установлена. 10-ая группа по ХГК, только 2 анализа отнесены к этой группе - *гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты*. Эти шпинелиды с довольно высокими концентрациями хрома (50,46—60,13 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Содержания  $\text{FeO}$  составляют 20,00—20,97 мас.% и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  от 4,16 до 8,07 мас.%. В этих кимберлитах Хуабэй выявлено также небольшое число зерен шпинелидов (по одному), которые на основе химико-генетической классификаций могут быть, по видимому, отнесены к 11-й, 12-й и 14-й группе. К 11-й химико-генетической группе *шпинелидов катаклазированных лерцолитов* отнесен 1 анализ, этот шпинелид характеризуется

содержаниями: MgO—13,84 мас.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—9,26 мас.%, TiO<sub>2</sub>—5,40 мас.%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—47,28 мас.%, FeO —13,62 мас.%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—10,50 мас.%.

Как видно на представленных диаграммах (рис. 2), выявлены различия в химическом составе хромшпинелидов из разных провинций. Отличительной чертой хромшпинелидов из кимберлитов Шандун является относительно широкое развитие высокохромистых и низкоглиноземистых разновидностей с повышенным содержанием титана (до 7,67% TiO<sub>2</sub>). Преобладают кристаллы, содержащие 1-3 % TiO<sub>2</sub>. Хромшпинелиды из кимберлитовой провинции Ляонин в основном более низкохромистые (51,0 - 58,16% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в них равно 3,17-12,90 %, а TiO<sub>2</sub> не превышает 2,44 %. Некоторые образцы принадлежат к алмазной ассоциации (рис. 2в). Многие хромшпинелиды в кимберлитах Китая характеризуются химической зональностью и наличием реакционных каемок. В реакционной кайме одного зерна хромшпинелида установлено увеличение содержаний TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и уменьшение Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В других случаях в составе каемок повышается количество TiO<sub>2</sub> и снижается - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Было установлено, что отличительной особенностью хромшпинелидов кимберлитов является повышенное содержание TiO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также относительно высокие концентрации Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (по сравнению с хромшпинелидами из Якутии). В этом отношении, а также по наличию зональности они близки к хромшпинелидам из кимберлитов Архангельской области (Богатилов и др., 1999). Еще одна особенность некоторого количества описываемых хромшпинелидов - низкое содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 2%) при высокой хромистости. В то же время хромшпинелиды алмазной ассоциации из кимберлитов Китая имеют относительно высокое содержание TiO<sub>2</sub> (рис. 2).

На основании проведённых исследований выявлены различия в распространённости хромшпинелидов из различных химико-генетических групп для высокоалмазоносных кимберлитов Шандун, алмазоносных кимберлитов Ляонин и

неалмазоносных кимберлитов (рис. 2в). Присутствие высоко-титанистых и высоко-железистых хромшпинелидов (11 и 12 группы) отличает Ляонин от Шандун. Группы 11 и 12 в провинции Шандун не установлены. Кроме того, в отличие от провинции Шандун, в Ляонин не установлена 2-ая группа по ХГК. В провинциях Шандун и Ляонин не установлены хромшпинелиды из 5 и 6 групп по ХГК. Важно отметить широкое распространение хромшпинелидов из алмазоносных пород (группы 1 - 3) в высокоалмазоносных кимберлитах Шандун. При этом установлено большее разнообразие генетических типов хромшпинелидов, в том числе высокожелезистых, в менее алмазоносных кимберлитах провинции Ляонин. В этой провинции установлены хромшпинелиды (группы 12 и 13), которые генетически связаны с зональными гранатами, т.е. являются продуктами мантийного метасоматоза. Высокоглинозёмистые разности установлены только в неалмазоносных кимберлитах.

Было проведено сравнение глубинных минеральных ассоциаций для хромшпинелидов из кимберлитов Хуабэй в Китае и из трех полей (Золотицкое, Верхотинское и Кепинское) в Архангельской алмазоносной провинции (ААП), включая месторождение им. Ломоносова и месторождение им. В. Гриба. На основании единой химико-генетической классификации мы сравнили распределение хромшпинелидов в кимберлитах Китая и ААП. Сравнение показало, что хромшпинелиды из Шандун похожи на минералы из алмазоносных кимберлитов Золотицкого поля (месторождение им. В.М. Ломоносова); хромшпинелиды из Ляонин похожи на минералы из слабо алмазоносных пород Верхотинского поля; хромшпинелиды из неалмазоносных кимберлитов Хуабэй похожи на минералы из неалмазоносных кимберлитов Кепинской группы тел; в Хуабэй нет аналогов для хромшпинелидов из трубки им. В.Гриба.

#### **Микрокристаллические шпинелиды из связующей массы кимберлитов**

Минералы связующей массы кимберлитов Китая изучены не достаточно, тогда как исследования, проведенные в России (Бовкун, 2000), показывают, что такие данные несут важную генетическую информацию. Широкое многообразие составов оксидных фаз, их количество и соотношение отражают глубину, динамику становления, характер изменения РТ-параметров, окислительной обстановки и химизма минералообразующей среды в процессе эволюции кимберлитовых систем. В данной работе мы использовали классификацию микрокристаллических оксидов, разработанную А.В. Бовкун (2000) на примере Якутии (Кротков и др. 2001). Согласно этой классификации, присутствие в кимберлитовой матрице шпинелидов из 1-3 ХГГ является необходимым условием алмазоносности кимберлитовых пород. Наиболее ранние оксидные минералы связующей массы кимберлитов для неалмазоносных тел – среднехромистые пикроферрихромиты 4-ой ХГГ, характеризующиеся средними содержаниями  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (<40 мас.%) и высокими  $\text{TiO}_2$  (>7мас.%). Шпинелиды 5-10 групп, характерной особенностью которых является высокое содержание титана при закономерном уменьшении содержания хрома, отражают длительность эволюции и динамики подъема кимберлитовых расплавов. Их количество и разнообразие коррелируют с фазами внедрения сложно построенных трубок. Шпинелиды 11-15 групп кристаллизуются на последних стадиях эволюции кимберлитовых расплавов при постепенном уменьшении титана в кимберлитовой матрице вплоть до кристаллизации магнетита.

В работе были изучены образцы кимберлитов из трёх алмазоносных трубок: Победа – 1 (район Мэн Инь), трубки № 42 и 50 (район Фусянь).

**Трубка № 50 (Бинхай).** Были изучены образцы кимберлитовых брекчий из трех фаз внедрения. Связующая масса имеет мелкозернистое строение и состоит из серпентина и карбонатов. Микрокристаллические оксиды распределены равномерно и составляют 4—7%. Они представлены шпинелидами, главным образом,

хромшпинелидами. *Ильменит и перовскит не обнаружены.* Выделения микрокристаллических шпинелидов имеют идиоморфную, реже неправильную или изометричную форму. Их размер составляет 10–25 мкм. Установлены выделения шпинелидов двух типов (рис. 3). Первая группа - зональные образования, в которых в различной степени растворенные ядра окружены сплошными или прерывистыми футляровидными оторочками мощностью до 6–7 мкм, повторяющими форму ядер и обычно отстающими от них на несколько мкм. Ядра футляровидных образований сложены высокохромистым Ti-содержащим пикрохромитом (1-я ХГГ) с высоким содержанием хрома и минимальным - титана и окисного железа (57,9 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 15,5 мас.%  $\text{MgO}$ ; 3,5 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3,9 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 9,4 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Каймы вокруг таких ядер образованы Al,Mg,Cr-содержащим титаномagnetитом (2,6 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 2,3 мас.%  $\text{MgO}$ ; 1,4 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3,3 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 48,5 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 12-я ХГГ). Вторая группа - гомогенные зерна без кайм и зерна, по краю которых на изображениях в отраженных электронах фиксируется тончайшая (~ 1 мкм) более яркая светлая кайма. Среди выделений этого типа установлены: высокохромистый Ti-содержащий пикрохромит (2-я ХГГ) с более низким содержанием хрома по сравнению с ядрами футляровидных образований (52,5 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 15,8 мас.%  $\text{MgO}$ ; 5,4 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4,9 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 11,6 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); низкохромистый пикроферрифerroхромит (24,8 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 4,9 мас.%  $\text{MgO}$ ; 4,4 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5,5 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 27,9 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и высокохромистый титаномagnetит (11,8 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 1,2 мас.%  $\text{MgO}$ ; 3,3 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3,9 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 39 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Состав микрокристаллических шпинелидов варьирует в широких пределах (рис. 4). Пикрохромиты, отвечающие наиболее ранним стадиям кристаллизации кимберлитового расплава, характеризуются очень высокой хромистостью и сравнительно низкими содержаниями титана и окисного железа (52,5–57,9 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ;

3,9–4,9 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 9,4–11,6 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Такие пикрохромиты характерны для связующей массы высокомагнезиальных кимберлитов ураганно-алмазоносных трубок Якутии: Нюрбинская, Ботуобинская, Айхал (Бовкун, 2000). В ААП близкие по составу пикрохромиты характерны для связующей массы алмазоносных кимберлитов Золотицкого поля (Богатиков и др., 1999), для тяжелой фракции и связующей массы которых ильменит также не характерен.

Сопоставление результатов исследования микрокристаллических оксидов из связующей массы кимберлита трубки № 50 (Бинхай) с литературными данными (Бовкун, 2000) показало, что изученный кимберлит имеет хромшпинелидовую специализацию оксидов связующей массы, так как пикроильменит в связующей массе и в тяжелой фракции породы отсутствует. Состав микрокристаллических шпинелидов свидетельствует об их образовании из расплава, обедненного титаном, при крайне высоких РТ-параметрах, в условиях низкого окислительно-восстановительного потенциала минералообразующей среды. Широкая распространенность пикрохромитов с содержанием  $> 54$  мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — показатель значительной глубины зарождения, и, следовательно, высокой потенциальной алмазоносности кимберлитового расплава, формирующего данную породу. Особенности эволюционного тренда изменения составов шпинелидов из связующей массы изученной породы свидетельствуют о том, что кристаллизация шпинелидов происходила в широком диапазоне скачкообразно изменяющихся РТ-параметров и окислительного потенциала минералообразующей среды при очень низкой активности титана. Повышенное содержание магния в высокохромистых пикрохромитах (15,5–15,8 мас.%  $\text{MgO}$ ) свидетельствует о высокомагнезиальном характере кимберлитового расплава на ранних стадиях его эволюции. Скачкообразное изменение РТ-параметров и окислительного потенциала минералообразующей среды, сравнительно неполный кристаллизационный тренд

шпинелидов, в котором отсутствуют ульвешпинели и в ограниченном числе представлены титаномагнетиты, свидетельствуют о сравнительно щадящих условиях для сохранности кристаллов алмаза в процессе подъема кимберлитов к поверхности и частичном, но не резко выраженном, снижении их первичной алмазоносности. В кимберлитах следующих фаз (50-2 и 50-3) более широко представлены зональные футляровидные выделения. Выделения хромшпинели имеют изъеденные контуры, появляется много сульфидов и сильно люминесцирующие редкоземельные минералы. В кимберлитах последних фаз присутствуют лишь реликты хромита и основным минералом становится рутил, т.е. условия для сохранности алмаза становятся неблагоприятными.

**Трубка № 42.** Были изучены образцы трех фаз внедрения. В **обр. 42-1** порода сильно изменена. Ее связующая масса имеет мелкозернистое строение и состоит из серпентина и карбонатов. Оксидные минералы распределены неравномерно. В большом количестве присутствует практически беспримесный магнетит, вероятно, метасоматический, образующий скопления мелких зерен неправильной формы. Микrokристаллические оксиды кимберлитового происхождения представлены шпинелидами и *перовскитом*. Ильменит не обнаружен.

Шпинелиды представлены титаномагнетитом (15-я ХГГ) и магнезиальным магнетитом (14-я ХГГ). Они образуют мелкие (5–15 мкм) идиоморфные зерна, вокруг которых нередко образуются “ажурные” оторочки мощностью до 20 мкм, состоящие из практически беспримесного магнетита. Титаномагнетит (93,6 мол.%  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ) характеризуется низкими содержаниями титана и магния (2,1 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 0,95 мас.%  $\text{MgO}$ ). Mg-магнетит отличается очень высоким содержанием магния (13,95 мас.%  $\text{MgO}$ ) при крайне малом содержании других примесей. *Выделения хромитов не обнаружены.* Перовскит слагает многочисленные зерна, размер которых обычно составляет от 5 до 30

мкм. Его состав характеризуется умеренным количеством примесей железа и циркония ( $2,3 \text{ мас.}\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ;  $0,97 \text{ мас.}\% \text{ ZrO}_2$ ) и отсутствием редкоземельных элементов.

В **обр. 42-2** микрокристаллические оксидные минералы представлены шпинелидами и рутилом. Ильменит и перовскит не обнаружены. Шпинелиды представлены, главным образом, хромистыми разностями: высокохромистым (2-я ХГГ) Ti-содержащим пикрохромитом ( $51,6\text{--}53,5 \text{ мас.}\% \text{ Cr}_2\text{O}_3$ ;  $10,7\text{--}12,5 \text{ мас.}\% \text{ MgO}$ ;  $4\text{--}5,6 \text{ мас.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ;  $3,8\text{--}4,1 \text{ мас.}\% \text{ TiO}_2$ ;  $0,3\text{--}0,6 \text{ мас.}\% \text{ MnO}$ ;  $15,4\text{--}18,3 \text{ мас.}\% \text{ FeO}$ ;  $9,9\text{--}11,9 \text{ мас.}\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ) и среднехромистым (3-я ХГГ) Ti-содержащим пикрохромитом ( $41,7 \text{ мас.}\% \text{ Cr}_2\text{O}_3$ ;  $6,7 \text{ мас.}\% \text{ MgO}$ ;  $4,5 \text{ мас.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ;  $4,5 \text{ мас.}\% \text{ TiO}_2$ ;  $1,8 \text{ мас.}\% \text{ MnO}$ ;  $24,3 \text{ мас.}\% \text{ FeO}$ ;  $16,9 \text{ мас.}\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ). Особенности составов этих последовательно кристаллизующихся хромшпинелидов показывают, что по мере падения РТ-параметров и кристаллизации менее хромистых разностей, содержание магния в них заметно уменьшалось, а содержания титана, марганца, двух- и трехвалентного железа, напротив, заметно увеличивались. Описанные пикрохромиты слагают идиоморфные зерна размером от 5 до 40 мкм, по краю которых на изображениях в отраженных электронах фиксируется тончайшая (около 1 мкм) прерывистая или сплошная ярко-белая кайма. Ее состав из-за малых размеров определить не удалось, можно лишь предполагать, что она имеет существенно железистый состав (вероятно, магнетит). Рутил ( $99,2 \text{ мас.}\% \text{ TiO}_2$ ) образует гомогенные зерна неправильной формы, в малом количестве присутствует примесь железа ( $0,4\text{--}0,8 \text{ мас.}\% \text{ FeO}$ ).

В **обр. 42-3** связующая масса породы имеет мелкозернистое строение и флогопит-карбонатный состав. В связующей массе оксидные минералы довольно многочисленны (до 7–10 об.%) и распределены равномерно. Они отличаются малыми размерами (5–60 мкм) и представлены, главным образом, шпинелидами, в существенно меньшей степени — рутилом. *Ильменит и перовскит не обнаружены.* Шпинелиды

имеют футляровидную форму и размер 30–60 мкм. Центральные участки, как правило, идиоморфные, их размер около 10–30 мкм. Они представлены высокохромистым Ti-содержащим пикрохромитом (50,5–53,5 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 11,5–11,7 мас.%  $\text{MgO}$ ; 4,1–5,4 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5,1–5,4 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 16,1–16,7 мас.%  $\text{FeO}$ ; 9,9–11,4 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). На изображениях в отраженных электронах (рис. 4) краевые участки пикрохромитовых ядер обычно более светлые и яркие, что позволяет предполагать увеличение содержания железа. Ядра пикрохромитов окружены прерывистыми (“ажурными”) футляровидными каймами, повторяющими форму пикрохромитовых ядер и отделенными от них прослойкой силикатного материала. Каймы сложены Cr-содержащим (7-я ХГГ) магнезиальным магнетитом (3,8 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 14 мас.%  $\text{MgO}$ ; 0,7 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1,1 мас.%  $\text{TiO}_2$ ; 54,4 мас.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), в компонентном составе которого ведущая роль принадлежит магнезиоферритовому и магнетитовому миналам (59,7 мол.%  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ; 31,2 мол.%  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ). Рутил (96,5–97,6 мас.%  $\text{TiO}_2$  и 0,9–1,6 мас.%  $\text{FeO}$ ) образует изометричные зерна размером от 15 до 65 мкм с неровными растворенными краями, иногда примыкающие к идиоморфным выделениям Ti-содержащих пикрохромитов.

Обнаружено овально-сферическое образование (автолит) размером 3х4 мм, в центральной части которого находятся округлые трещиноватые и деформированные зерна граната диаметром до 1,3 мм. К гранату примыкают таблички магнезиального флогопита длиной до 0,9 мм. Внешняя зона автолита отличается микрозернистым строением и большим количеством очень мелких пылевидных выделений рудных минералов. В межзерновом пространстве данного образования, а также в виде включений в краевых участках недеформированных табличек флогопита, наблюдаются идиоморфные зерна шпинелидов гомогенного строения размером 30—120 мкм, которые представлены пикроалюмохромитом (3-я ХГГ) с очень низким содержанием

титана и малым количеством окисного железа (11,1–11,5 мас.% MgO; 14,9–16,3 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 45,6–48,5 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,7–0,8 мас.% TiO<sub>2</sub>; 18,5–19,3 мас.% FeO; 5,8–7,7 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). В соответствии с химико-генетической классификацией хромшпинелидов ультраосновного парагенезиса из кимберлитов (Богатилов и др., 1999) их состав схож со среднехромистыми хромшпинелидами из лерцолитов. Однако, данные хромшпинелиды отличаются более низкими содержаниями Mg и Al и более высоким содержанием двухвалентного железа. В сильно деформированном и трещиноватом (“изломанном”) зерне флогопита, находящемся в центральной части данного сферического образования, наблюдаются выделения шпинелидов, образующие “цепочки” из разнообразных по размеру (от 15 до 170 мкм) идиоморфных и неправильных, часто трещиноватых зерен, расположенных вдоль трещин. Центральные участки таких зерен представлены Ti-содержащим пикрохромитом (12,1–12,5 мас.% MgO; 7,7–13,4 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 45,8–47,6 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2,9–5,2 мас.% TiO<sub>2</sub>; 0,3–0,4 мас.% MnO; 16,5–17,0 мас.% FeO; 9,2–11,8 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), отличающимся от описанных выше пикроалюмохромитов более высокими содержаниями титана и окисного железа и меньшим содержанием алюминия. В одном из крупных зерен установлена зональность. От центра к краю содержания хрома и алюминия уменьшаются, а титана, окисного железа и марганца увеличиваются (12,2 мас.% MgO; 6,5 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 37,9 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 8,1 мас.% TiO<sub>2</sub>; 1,0 мас.% MnO; 17,1 мас.% FeO; 19,2 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Вокруг других крупных зерен наблюдаются прерывистые футляровидные каймы толщиной до 25 мкм, состоящие из высокохромистого титаномagnetита (0,7–1 мас.% MgO; 0,9–1,5 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 16,3–16,4 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 6,1–6,6 мас.% TiO<sub>2</sub>; 0,7–0,8 мас.% MnO; 39,3–39,6 мас.% FeO; 36,7–36,8 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). К внешнему краю недеформированного зерна флогопита часто примыкают единичные идиоморфные и неправильные мелкие (5–30 мкм) зерна шпинелидов и их скопления, центральные участки которых частично растворены.

Центральная часть одного из таких зерен имеет следующий состав: 22,2 мас.% MgO; 1,7 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 23,7 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,6 мас.% TiO<sub>2</sub>; 0,3 мас.% MnO; 9,4 мас.% FeO; 41,1 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Преобладают магнезиоферритовый (52,2 мол.% MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) и пикрохромитовый (31,6 MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) миналы, тогда как доля магнетитового минала составляет 8,8 мол.% FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

**Тр. Победа 1.** Были изучены образцы трех фаз внедрения. В **обр. Победа 1–1** выявлены следующие типы микрокристаллических оксидов: 1) шлировые выделения, образованные при замещении силикатов; 2) отдельные хорошо огранённые зерна квадратных очертаний; 3) неправильной формы выделения с изъеденными краями и отчетливо проявленной зональностью. Изучение фазового состава рудных минералов показало, что преобладающей оксидной фазой является *перовскит*. Соотношения перовскита к хромиту составляет 10:1. В образце есть сульфиды, и они составляют значительную часть рудных вкрапленников. Хромшпинелиды отличаются высоким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (53,8 – 54,8 мас.%) и MgO (13,88 – 14,01 мас.%), т.е. по составу они отвечают алюмомагнохромиту. Перовскиты характеризуются значительной примесью железа (до 1,88 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и церия (до 4,3 мас.% Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Крупные выделения – очень изъеденные. Совокупность полученных данных свидетельствует о не очень благоприятных условиях нахождения алмазов в таком кимберлитовом расплаве.

В **обр. Победа 1–2 и Победа 1–3**, также как и в **обр. Победа 1–1**, преобладающей фазой является перовскит. Выделения хромита очень мелкие, а перовскиты характеризуются неправильной формой (кляксы) и изъеденными краями. Плохая сохранность микрокристаллов и сильная степень их замещения затрудняют проведение корректного анализа. По сравнению с образцом Победа 1–1, в хромитах увеличивается содержание железа и уменьшается содержание хрома, что видно на представленных диаграммах (рис. 5), т.е условия кристаллизации данных кимберлитов были более

окислительными и более щелочными.

### Заключение

По особенностям химического и фазового состава хромшпинелидов установлена длительная и сложная эволюция кимберлитов Хуабэй, которая была индивидуальна в каждой трубке. Изученные кимберлитовые тела различаются по особенностям химического и фазового состава как ксенокристов мантийных хромшпинелидов, так и магматогенных микрокристаллических оксидов.

В высокоалмазоносных кимберлитах Шандун много хромшпинелидов из высокоалмазоносных дунитов, гарцбургитов и лерцолитов (парагенезис 1 и 3 ХГГ). В среднеалмазоносных кимберлитах Ляонин меньше хромшпинелидов из парагенезиса 1 и 3 ХГГ, но ещё значительно содержание среднехромистых шпинелидов из лерцолитов (парагенезис 4 ХГГ). В неалмазоносных кимберлитах Хуабэй много низкохромистых шпинелидов из лерцолитов (3 и 5 ХГГ).

Во всех телах среди минералов связующей массы **отсутствует пикроильменит**, а от первой фазы внедрения к третьей нарастает окислительный потенциал и щелочность среды минералообразования. В ранних фазах установлены пикрохромиты — показатель значительной глубины зарождения кимберлитового расплава, во второй фазе - микрокристаллические шпинелиды с изъеденными краями и зональностью: увеличивается содержание Fe и уменьшается содержание Cr к краям зерен. Последние фазы содержат магнетит, специфические люминесцирующие минералы и фазы, содержащие H<sub>2</sub>O, в них много перовскита и сульфидов.

Сопоставляя полученные результаты с данными по Якутии (Бовкун, 2000; Серов, 2002) можно сделать вывод о том, что только кимберлиты трубки Победа-1 (Шандун) содержат ультравысокохромистые пикрохромиты из кимберлитов с уникальной,

высокой и средней алмазонасностью. Микрокристаллические шпинелиды в трубке N50 и N42 являются типоморфными для кимберлитов Mg-Fe-Ti-типа высокой средней и низкой алмазонасности. Полные кристаллизационные тренды шпинелидов и присутствие зональных неомогенных зерен свидетельствуют о невысокой скорости подъема кимберлитового расплава к поверхности и о постепенном увеличении окислительного потенциала среды минералообразования. Такие условия являются неблагоприятными для сохранности алмаза. Таким же неблагоприятным фактором является и присутствие перовскита, который характерен для связующей массы низко- и неалмазонасных пород Кепинского поля ААП (Богатилов и др., 1999) и Куонамского района Якутии (Серов, 2002).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бао Яньнань. Минералогия алмазных месторождений Китая: Автореф. канд. дис. М., 1991.
2. Богатилов О. А., Гаранин В. К., Кононова В. А. и др. Архангельская алмазонасная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). М.: Изд-во МГУ, 1999.
3. Бовкун А.В. Минералогия оксидов из связующей массы кимберлитов Якутии (генетические и прикладные аспекты) : Автореф. канд. дис. М., 2000.
4. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и Мира. М.: Геоинформмарк, 2002.
5. Гринсон А. С., Дун Цзунь Ин. Кимберлитовый магматизм и структура литосферы Китайской платформы // Докл. АН СССР. 1984. 276. №4.
6. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983.
7. Каминский Ф. В., Кимберлиты и алмазы Китайской Народной Республики. М.:

Недра, 1988.

8. Кротков В.В., Кудрявцева Г.П., Богатиков О.А. и др. Новые технологии разведки алмазных месторождений. М.: ГЕОС, 2001.

9. Серов И.В. Минералогические и петролого-геохимические характеристики кимберлитовых и родственных им пород Якутской алмазоносной провинции (генетические и прикладные аспекты) : Автореф. канд. дис. М., 2002.

10. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974.

11. Харьков А.Д., Квасница В.Н., Сафронов А.Ф., Зинчук Н.Н. Типоморфизм алмаза и его минералов-спутников из кимберлитов. Киев: Наук.думка, 1989.

12. Лу Фэнсян, Чи Цзишан., Чжао Лэй. Кимберлиты в платформе Хуабэй. Пекин: Изд-во Геологии, 1996 (на китайском языке)

13. Ма Сингхенг Основы тектоники Китая. Пекин: Изд-во Геологии, 1983 (на китайском языке)

14. Mitchell R.H. Kimberlite, orangite and related Rocks. N.Y.: Plenum Press, 1995.

15. Haggerty S.E. The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlite // Phys. Chem. Earth, 1975, 9, p. 295-307

## Рисунки

Рис. 1. Размещение кимберлитов на территории Китая (Ma Xingheng, 1983).

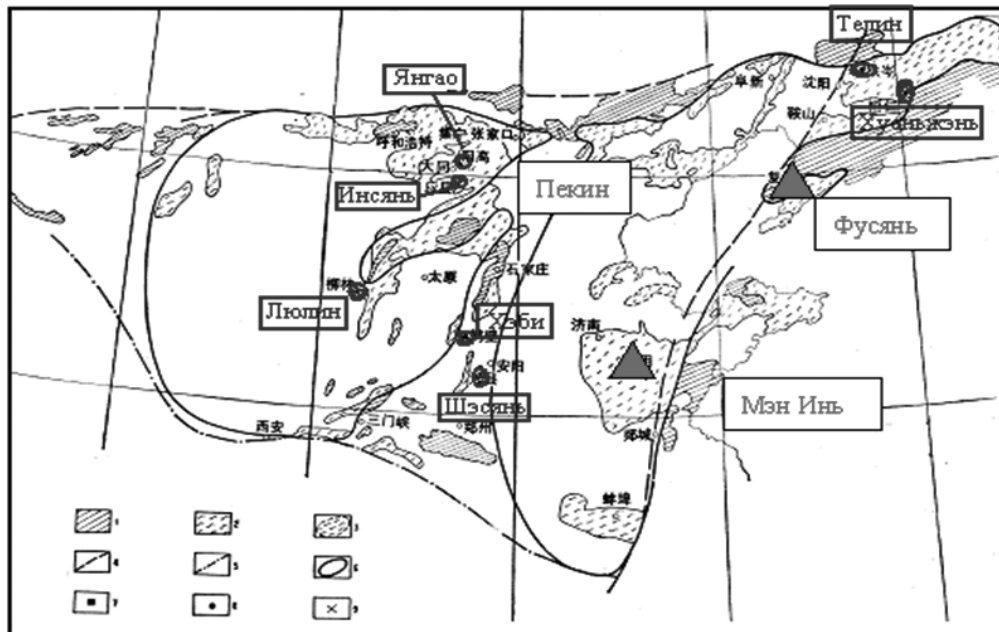


Рис.2. Диаграммы составов (а, б) и распределение (в) шпинелидов различных химико-генетических групп (1-14) в кимберлитах Шандун, Ляонин и других неалмазоносных провинциях Хуабэй. Цифры оконтуренных областей соответствуют номерам химико-генетических групп шпинелидов. Пунктиром показана область хромшпинелидов алмазной ассоциации; N—общее число изученных шпинелидов, n—частота встречаемости, %.

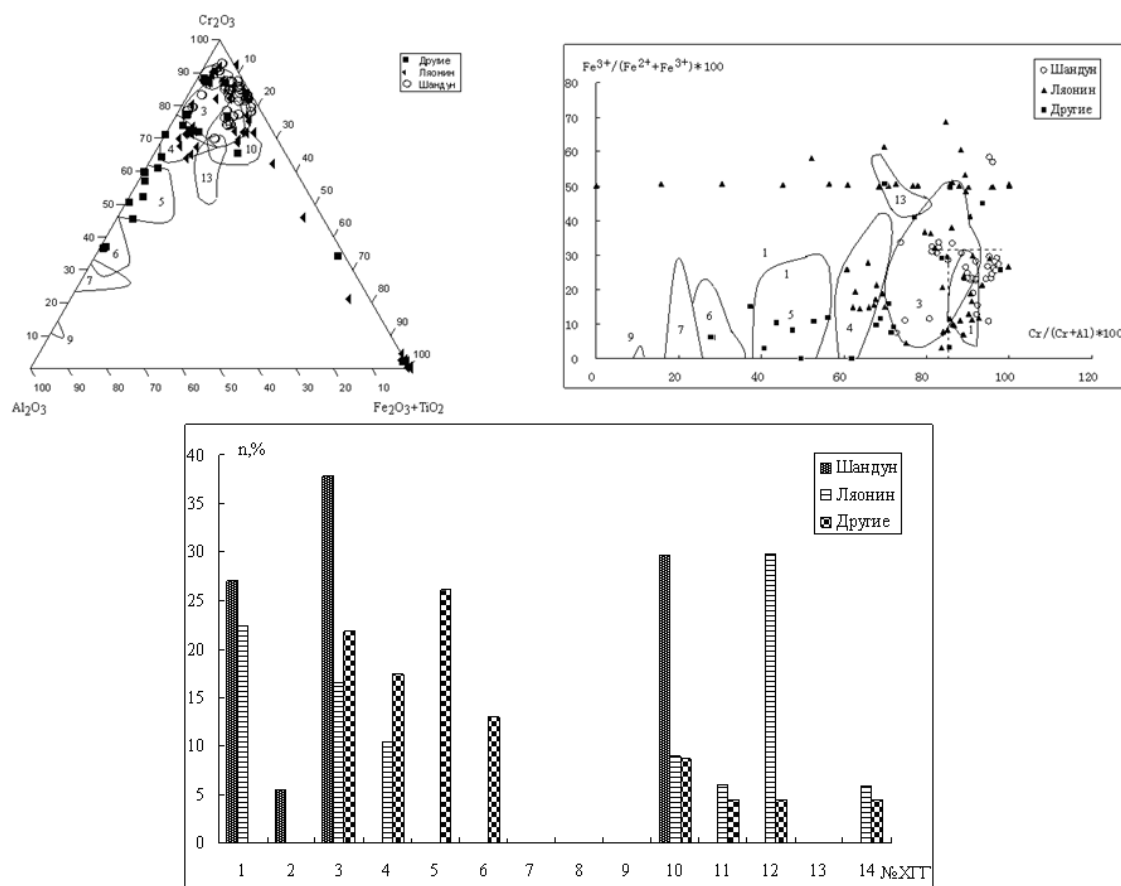
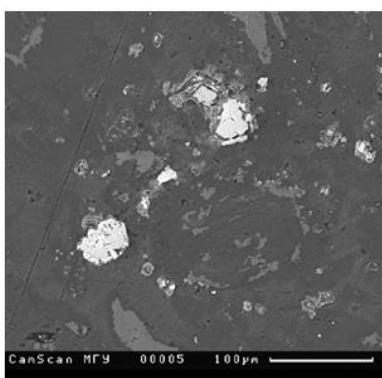
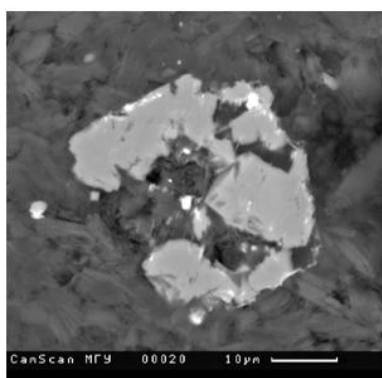


Рис. 3. Строение микрокристаллических оксидов из связующей массы кимберлитов

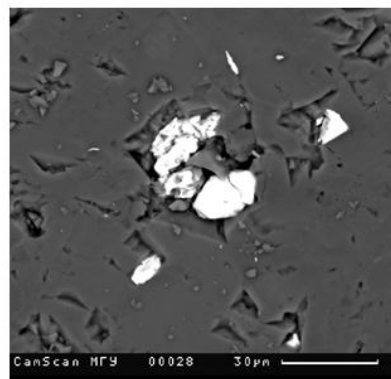
Хуабэй: однородные ограненные кристаллы из первых фаз внедрения и коробчатые неоднородные кристаллы, характерные для завершающих стадий. Изображения в отраженных электронах.



Трубка Победа-1 (Шенгли),обр. 1 и 3.



Трубка 42, обр. 2 и 3.



Трубка 50 (Бинхай) обр. 2 и 3.

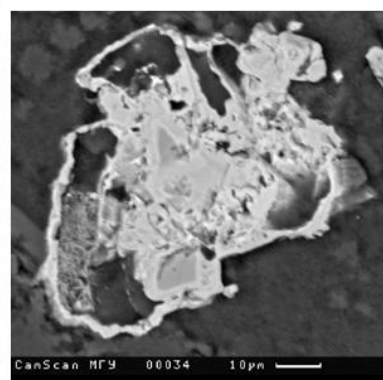
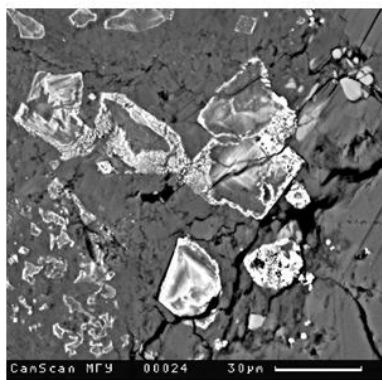
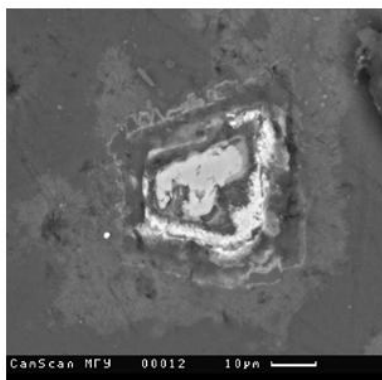
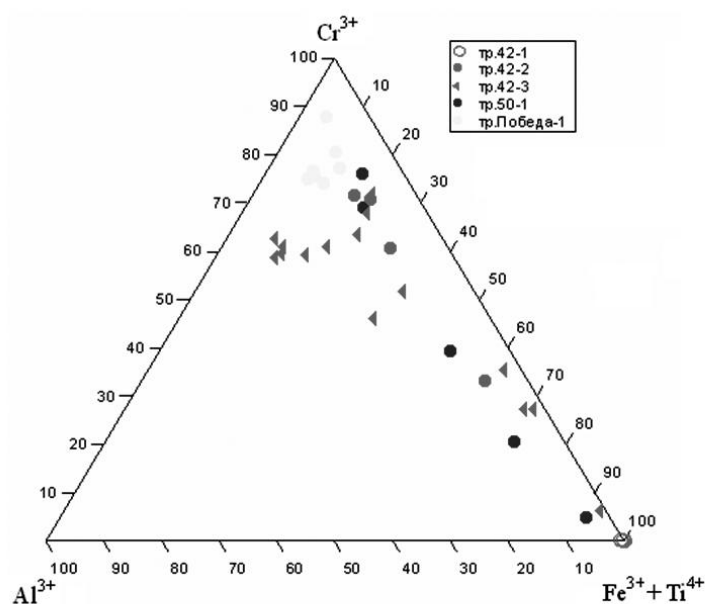


Рис.4. Особенности химического состава микрокристаллических шпинелидов из кимберлитов Китая



Авторы:

Гао Сяоин – аспирантка каф. минералогии геологического факультета МГУ

Посухова Татьяна Владимировна - доцент каф. минералогии геологического факультета

МГУ, кандидат геолого-минералогических наук

Тел.: 939 -39-82 (раб), 499-135-40-73 (дом), 8-916-216-36-23 (моб)

e-mail: tposukhova@mail.ru