

УДК 553.8

Гао Сяоин<sup>1</sup>, Т.В. Посухова<sup>2</sup>

## ХРОМШПИНЕЛИДЫ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ СЕВЕРНОГО КИТАЯ (платформа Хуабэй)

Изучены образцы кимберлитов из алмазоносных трубок провинций Шандун и Ляонин. Выявлено сходство набора и химического состава хромшпинелидов из кимберлитов Китая и кимберлитов Архангельской провинции в России. Установлена их длительная и сложная эволюция, индивидуальная для каждой трубки. Для кимберлитов провинции Шандун установлены высокохромистые шпинелиды, характеризующие формирование кимберлитов на большой глубине в области термодинамической устойчивости алмаза. Установлена смена окислительно-восстановительной обстановки, что отражается в широких пределах колебания химического состава микрокристаллических шпинелидов вплоть до образования титаномагнетита и магнетита.

*Ключевые слова:* хромшпинелиды, микрокристаллические оксиды, кимберлиты Китая.

Samples from the diamond-bearing pipes (Mengyin and Fuxian regions) were investigated. Similarity on a chemical composition of Cr-spinels from kimberlites of the China and kimberlites of the Arkhangelsk province in Russia was revealed.

Long and complex evolution, individual for each pipe is established. It is established that the high-Cr chromites are abundant in Shundun kimberlites. It means that the kimberlites were forming at the large depths in the field of thermodynamic stability of diamond. Changes of the oxidizing conditions were established and they reflected over a wide range of fluctuations of a chemical composition of microcrystalline spinels down to formation of Ti-magnetite and magnetite.

*Key words:* chromites, microcrystalline oxides, China kimberlites.

**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 Южной 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], не проведен анализ типохимизма индикаторных минералов и микрокристаллических оксидов из связующей массы кимберлитов Китая на основе их единой химико-генетической классификации.

Цель статьи — выявление минералогических и генетических особенностей хромшпинелидов из кимберлитов Северного Китая (платформа Хуабэй), исследование типоморфизма хромшпинелидов в алмазоносных и неалмазоносных кимберлитовых трубках Северного Китая и сравнение их с кимберлитами других регионов. Впервые для изучения кимберлитов Китая применен методический подход, разработанный в лаборатории месторождений алмаза геологического факультета МГУ, успешно использованный и для других районов мира [Кротков и др., 2001].

В качестве модельного объекта для сопоставительных исследований выбрана Архангельская алмазоносная провинция, на объектах которой эта методика применена наиболее полно и успешно [Богатиков и др., 1999].

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

**Геолого-петрографическая характеристика кимберлитов Китая.** На территории КНР основные коренные месторождения алмаза обнаружены на Северо-Китайской платформе (провинция 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,

<sup>1</sup> Научно-технологический университет Китая, Хефей, геологический факультет, науч. с., e-mail: gaojie@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, доцент, канд. геол.-минер. наук, e-mail: tposukhova@mail.ru

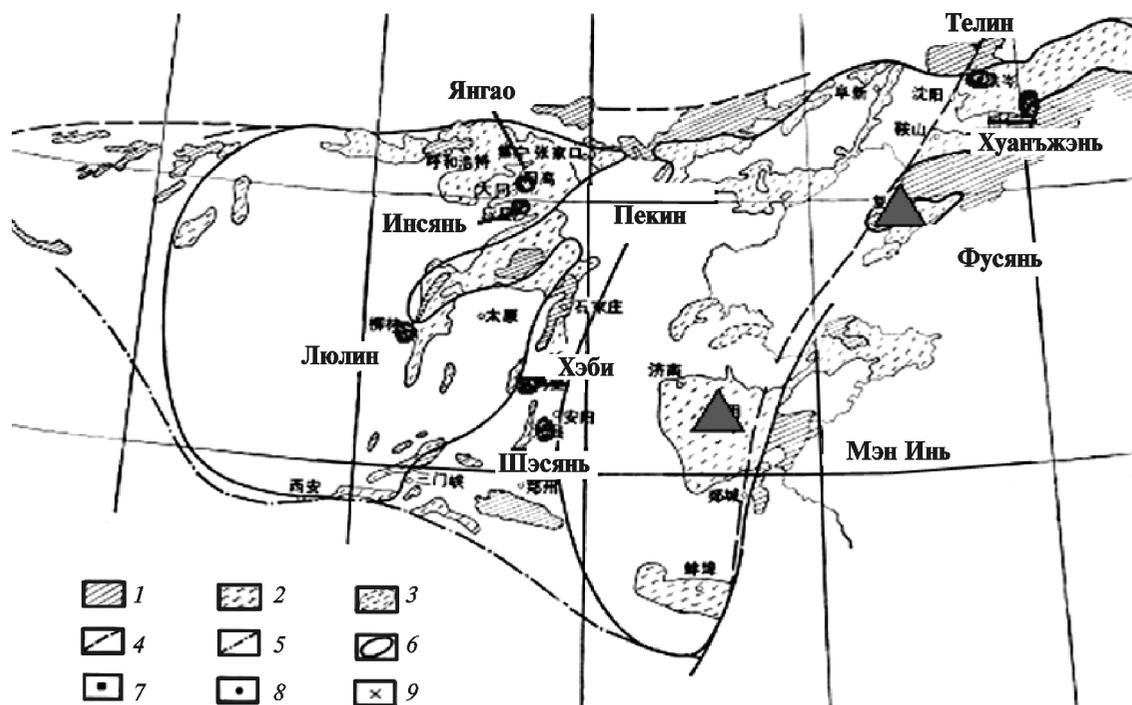


Рис. 1. Размещение кимберлитов на территории Китая, по [Ma Xingheng, 1983]: 1 — протерозойские комплексы; 2 — архейский кристаллический фундамент; 3 — выходы архейского кристаллического фундамента; 4 — глубинные разломы; 5 — граница платформы; 6 — граница древнего ядра; 7 — алмазоносные кимберлиты; 8 — неалмазоносные кимберлиты; 9 — К-Мг-лампрофиры.

Шэсянь, Люлин, Инсянь, Янгао [Каминский, 1988]. Кимберлиты представлены трубками, дайками и силлами. Кимберлитовые районы Мэн Инь (провинция Шандун) и Фусянь (провинция Ляонин) — главные плутоногенные месторождения алмаза в Китае [Ma Сингхенг, 1983]. Для исследований выбраны четыре главных месторождения из этих провинций:

1) трубка Победа-1 (Шенгли, район Мэн Инь), высокоалмазоносная, состоит из двух тел, сливающихся на глубине, сложена крупнокристаллическим порфировым кимберлитом с малым содержанием флогопита;

2) трубка Красный флаг № 6 (район Мэн Инь) среднеалмазоносная, самая большая по площади в этом районе, сложена крупнокристаллическим порфировым кимберлитом и флогопитовым кимберлитом;

3) трубка № 50 (Бинхай, район Фусянь) высокоалмазоносная, сложена крупнокристаллическим порфировым кимберлитом, кимберлитовыми туфобрекчиями и крупнокристаллическими порфировыми кимберлитовыми брекчиями, выявлены 4 магматические фазы;

4) трубка № 42 (район Фусянь) среднеалмазоносная, состоит из трех тел, сложена крупнокристаллическими порфировыми флогопитовыми кимберлитами, шарообразными крупнокристаллическими порфировыми кимберлитами и крупнокристаллическими кимберлитовыми туфобрекчиями, установлены 4 фазы внедрения.

**Мантийные ксенокристы хромшпинелидов в кимберлитах платформы Хуабэй.** Основные сведения о мантийных условиях образования кимберлитов можно получить в результате изучения индикаторных минералов кимберлитов, в том числе хромшпинелидов из алмазоносных и неалмазоносных трубок. Из литературных данных известно [Бао Яньнань, 1991; Лу Фэнсян, 1996], что хромшпинелиды в кимберлитах Китая содержатся в повышенном количестве. В статье обобщены данные о фазовом и химическом составе зерен хромшпинелидов крупнее 1 мм (макрозерна) из трубок № 42 и 50, полученные нами (табл. 1), а также опубликованные ранее данные для этих минералов из других объектов Хуабэй. Парагенетическую принадлежность хромшпинелидов устанавливали с применением методов кластерного и дискриминантного анализов и на основе химико-генетической классификации (ХГК), разработанной в МГУ [Богатиков и др., 1999].

В результате статистической обработки среди проанализированных нами хромшпинелидов (15 образцов) выделены только 2 химико-генетические группы. Три анализа (14%) отнесены к 3-й группе по ХГК (*лещолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки*). Эти хромшпинелиды характеризуются средним содержанием<sup>3</sup> MgO 10,91; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4,18; TiO<sub>2</sub> 1,01; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 62,41; FeO 16,33; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4,01. Для них характерно высокое содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (среднее 62,41). Восемнадцать анализов (85%) отнесены к 12-й группе по ХГК

<sup>3</sup> Во всех случаях, кроме специально оговоренных, содержание оксидов в мас. %.

Таблица 1

## Электронно-зондовые анализы макрокристаллических зерен хромшпинелидов из кимберлитов платформы Хуабэй

| Номер анализа                     | Содержание оксидов, мас.% |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|--------------------------------|--------|
|                                   | MgO                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | FeO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Сумма  |
| Трубка № 50                       |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
| 13                                | 10,90                     | 4,21                           | 0,96             | 61,98                          | 0,25 | 16,38 | 4,22                           | 98,90  |
| 14                                | 10,88                     | 4,16                           | 1,06             | 61,85                          | 0,22 | 16,31 | 4,17                           | 98,66  |
| 15                                | 10,94                     | 4,17                           | 1,00             | 63,41                          | 0,38 | 16,30 | 3,63                           | 99,83  |
| 1                                 | 0,38                      | 0,08                           | 0,02             | 0,19                           | 0,13 | 44,17 | 49,82                          | 94,80  |
| 2                                 | 0,09                      | 0,03                           | 0,00             | 0,27                           | 0,00 | 45,80 | 50,91                          | 97,10  |
| 3                                 | 0,81                      | 0,07                           | 0,17             | 0,28                           | 0,00 | 46,25 | 52,79                          | 100,37 |
| 4                                 | 0,17                      | 0,00                           | 0,12             | 0,18                           | 0,01 | 45,06 | 50,32                          | 95,86  |
| 5                                 | 0,13                      | 0,07                           | 0,06             | 0,23                           | 0,00 | 46,38 | 51,62                          | 98,50  |
| 6                                 | 0,22                      | 0,03                           | 0,10             | 0,16                           | 0,16 | 44,93 | 50,43                          | 96,03  |
| 7                                 | 0,29                      | 0,14                           | 0,18             | 1,96                           | 0,01 | 36,17 | 39,64                          | 78,39  |
| 8                                 | 0,16                      | 0,04                           | 0,01             | 1,36                           | 0,06 | 39,79 | 43,86                          | 85,28  |
| 9                                 | 0,09                      | 0,03                           | 0,12             | 1,09                           | 0,09 | 41,42 | 45,71                          | 88,55  |
| 10                                | 0,16                      | 0,05                           | 0,35             | 0,00                           | 0,10 | 44,10 | 49,39                          | 94,15  |
| 11                                | 0,26                      | 0,01                           | 0,11             | 0,11                           | 0,00 | 43,49 | 48,78                          | 92,76  |
| 12                                | 0,69                      | 0,09                           | 0,12             | 0,06                           | 0,09 | 42,53 | 48,62                          | 92,20  |
| 16                                | 0,42                      | 0,00                           | 0,03             | 0,09                           | 0,00 | 44,07 | 49,76                          | 94,37  |
| 17                                | 0,51                      | 0,04                           | 0,02             | 0,05                           | 0,02 | 43,79 | 49,63                          | 94,06  |
| 18                                | 0,29                      | 0,03                           | 0,04             | 0,15                           | 0,13 | 43,38 | 48,82                          | 92,84  |
| 19                                | 0,56                      | 0,00                           | 0,03             | 0,07                           | 0,38 | 42,10 | 48,28                          | 91,41  |
| 20                                | 0,55                      | 0,03                           | 0,24             | 0,02                           | 0,31 | 42,46 | 48,59                          | 92,20  |
| 21                                | 0,54                      | 0,01                           | 0,58             | 0,09                           | 0,47 | 43,76 | 50,17                          | 95,62  |
| Образцы из ксенолитов перидотитов |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
| 1                                 | 5,15                      | 18,36                          | 0,70             | 29,51                          | 0,34 | 29,67 | 13,68                          | 97,41  |
| 2                                 | 5,34                      | 18,94                          | 0,69             | 29,71                          | 0,31 | 29,18 | 12,91                          | 97,08  |
| 3                                 | 8,09                      | 18,57                          | 0,70             | 29,38                          | 0,33 | 24,32 | 13,44                          | 94,82  |

(парагенезис с зональными гранатами). Эта группа отличается низким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0–1,96) и высоким содержанием железа (36,17 – 46,38 FeO, 39,64 – 52,79 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). К этой группе отнесены магнетиты, которые, скорее всего, вторичные и образуются при серпентинизации оливина. Главная особенность всех изученных хромшпинелидов — низкое содержание титана, включая вторичные магнетиты. Чтобы полнее охарактеризовать состав хромшпинелидов, мы обработали результаты предыдущих исследований их химического состава (127 анализов) для алмазоносных кимберлитов провинций Шандун, Ляонин и других неалмазоносных провинций.

**Кимберлитовая провинция Шандун.** В результате статистической обработки выделены 4 химико-генетические группы хромшпинелидов из кимберлитов Шандун (37 анализов). Первая группа по ХГК (10 анализов) — высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты (включения в алмазе).

Вариации Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для минералов этой группы составляют 60,77–66,54, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — от 8,76 до 12,98, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — от 2,1 до 6,22 и FeO — от 12,86 до 18,81, содержание TiO<sub>2</sub> незначительное (0,12–2,70). Вторая группа по ХГК (2 анализа) — алмазоносные гарцбургиты с высокохромистым шпинелидом. Для них

характерно слегка повышенное содержание MgO (в среднем 19,08) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в среднем 13,88), более низкое содержание FeO (9,19), содержание Al, Ti и Cr не сильно отличается от такового в хромшпинелидах из первой группы ХГК. В провинции Ляонин такие хромшпинелиды не установлены. Третья группа по ХГК (14 анализов) — лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки — отличается от предыдущих групп более низким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (55,53–60,54), несколько большим количеством Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,99–13,66) и повышенным содержанием FeO (14,63–18,57). Десятая группа по ХГК (11 анализов) — гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты — отличается еще более низким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50,18–57,54) и высоким TiO<sub>2</sub> (2,83–4,35). На диаграммах (рис. 2) видно, что среди шпинелидов провинции Шандун много высокохромистых разновидностей из алмазоносных парагенезисов, а высокохромистые шпинелиды обогащены титаном.

**Кимберлитовая провинция Ляонин.** В результате статистической обработки выделены 7 химико-генетических групп хромшпинелидов из кимберлитов Ляонин (67 анализов). Первая группа по ХГК (15 анализов) — высокоалмазоносные дуниты и

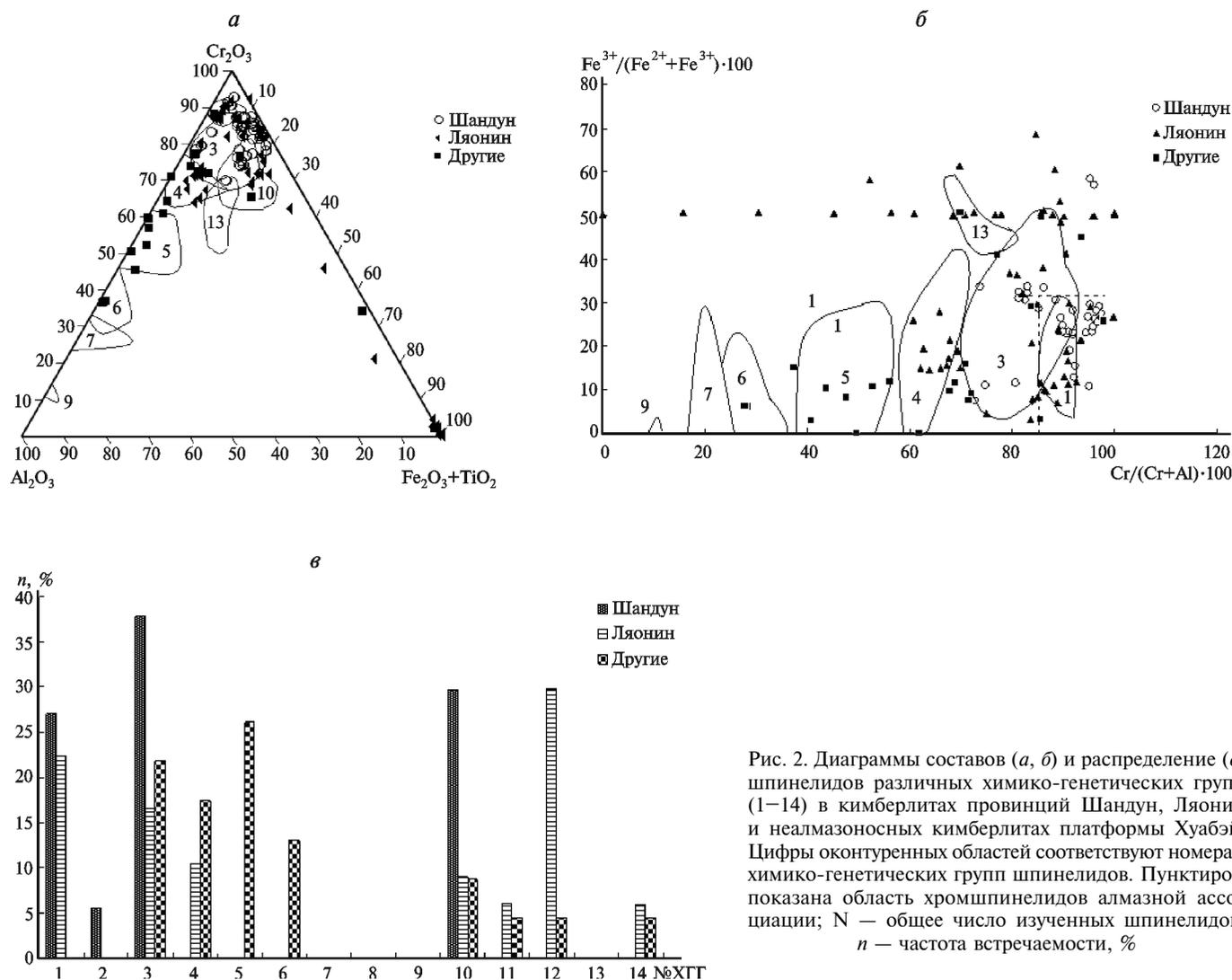


Рис. 2. Диаграммы составов (а, б) и распределение (в) шпинелидов различных химико-генетических групп (1–14) в кимберлитах провинций Шандун, Ляонин и неалмазоносных кимберлитах платформы Хуабэй. Цифры оконтуренных областей соответствуют номерам химико-генетических групп шпинелидов. Пунктиром показана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

гарцбургиты (включения в алмазе). Вариации  $Cr_2O_3$  для минералов этой группы составляют 61,77–65,81;  $Al_2O_3$  0,06–8,12;  $Fe_2O_3$  0,54–4,97 и FeO 12,33–16,43. Содержание  $TiO_2$  в этом минерале незначительно (0,01–1,06). Третья группа по ХГК (11 анализов) — лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки. Для них характерно чуть более высокое содержание  $Al_2O_3$  (среднее 9,33) и  $TiO_2$  (среднее 1,46), более низкое  $Cr_2O_3$  (среднее 55,94). Содержание MgO (в среднем 11,49) не сильно отличается от такового в хромшпинелидах из группы 1. Здесь несколько больше FeO (в среднем 16,60) и повышенное содержание  $Fe_2O_3$  (в среднем 4,75).

Четвертая группа ХГК (7 анализов) — лерцолиты со среднехромистым шпинелидом. Они отличаются от предыдущих групп наиболее низким содержанием  $Cr_2O_3$  (44,17–50,42) и более высоким содержанием  $Al_2O_3$  (14,6–19,4). Содержание MgO (среднее 12,93),  $TiO_2$  (среднее 0,48) и железа ( $Fe_2O_3$  2,33–5,94; FeO 12,35–22,05) не сильно отличается от такового в хромшпинелидах из 10-й и 3-й групп. Эта группа в провинции Шандун не установлена. Десятая группа

ХГК (6 анализов) — гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты. Для этих хромшпинелидов характерно слегка повышенное содержание  $TiO_2$  (1,97–4,41) и  $Fe_2O_3$  (8,48–11,37).

Одиннадцатая группа ХГК (4 анализа) — катаклазированные лерцолиты. Эти шпинелиды имеют довольно высокую концентрацию  $Cr_2O_3$  (46,78–52,8) и характеризуются повышенным содержанием  $Fe_2O_3$  (от 10,74 до 17,5) и  $TiO_2$  (4,3–6,73). Минералы этой и следующей группы в провинции Шандун не установлены. Двенадцатая группа ХГК (20 анализов) — зональные гранаты. Эта группа очень сильно отличается от предыдущих по очень малому содержанию  $Cr_2O_3$  (0–1,96), очень высокому содержанию двухвалентного и трехвалентного железа (FeO 28,99–46,38;  $Fe_2O_3$  39,64–52,79). Ни к одной из выделенных химико-генетических групп нельзя отнести 4 анализа всех изученных зерен. Эти шпинелиды имеют следующий состав: MgO 0,41–17,3;  $Al_2O_3$  0,49–3,98;  $TiO_2$  9,15–63,79;  $Cr_2O_3$  0,17–33,25; FeO 7,19–19,51 и  $Fe_2O_3$  8,24–34,53.

Другие (неалмазоносные) кимберлиты платформы Хуабэй. В этих кимберлитах установлены 5 основ-

ных химико-генетических групп хромшпинелидов. Третья группа ХГК (5 анализов) — *лерцолиты с высокохромистым шпинелидом, гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки*. Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  для минерала этой группы составляет 51,51–60,29,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — от 6,66 до 16,03,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — от 0,96 до 6,92 и  $\text{FeO}$  — от 15,25 до 26,06. Содержание  $\text{TiO}_2$  в этом минерале незначительно (0,02–2,75). Четвертая группа ХГК (4 анализа) — *лерцолиты со среднехромистым шпинелидом*. Для них характерно слегка пониженное содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (42,43–49,76), более высокое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14,56–25,02) и  $\text{MgO}$  (5,29–15,55). Пятая группа ХГК (6 анализов) — *лерцолиты со среднехромистым шпинелидом*. Они сильно отличаются от предыдущих хромшпинелидов наиболее высоким содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (27,75–34,79) и  $\text{MgO}$  (11,94–15,52), наиболее низким содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (31,67–41,58). Здесь же отмечено небольшое изменение концентрации  $\text{TiO}_2$  (0,05–0,36) и железа (0–2,84  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 12,68–17,7  $\text{FeO}$ ). Эта группа в провинциях Шандун и Ляонин не установлена.

Шестая группа ХГК (3 анализа) — *гранатовые вебстериты и гарцбургиты с низкохромистым шпинелидом*. Их отличительные особенности — высокая глиноземистость (41,44–43,02  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и соответственно пониженное содержание хрома (24,87–25,14  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); титана практически нет (0,00–0,40  $\text{TiO}_2$ ); очень мало трехвалентного железа (0,81–0,87  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), а содержание закисного железа варьирует от 11,09 до 11,88  $\text{FeO}$ . Эта группа в провинциях Шандун и Ляонин также не установлена. Десятая группа ХГК (2 анализа) — *гранат-клинопироксен-шпинелевые сростки, катаклазированные лерцолиты*. Эти шпинелиды с довольно высоким содержанием хрома (50,46–60,13  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ),  $\text{FeO}$  20,00–20,97 и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  от 4,16 до 8,07. В неалмазоносных кимберлитах Хуабэй выявлено по одному зерну шпинелидов, которые на основе химико-генетической классификации можно, по-видимому, отнести к 11-, 12- и 14-й группам ХГК. К одиннадцатой группе ХГК (*шпинелиды катаклазированных лерцолитов*) отнесен один анализ, этот шпинелид имеет следующий состав:  $\text{MgO}$  13,84;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  9,26;  $\text{TiO}_2$  5,40;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  47,28;  $\text{FeO}$  13,62;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  10,50.

Как видно на диаграммах (рис. 2), выявлены различия в химическом составе хромшпинелидов из разных провинций. Отличительная черта хромшпинелидов из кимберлитов Шандун — относительно широкое развитие высокохромистых и низкоглиноземистых разновидностей с повышенным содержанием титана (до 7,67  $\text{TiO}_2$ ). Преобладают кристаллы, содержащие 1–3%  $\text{TiO}_2$ . Хромшпинелиды из кимберлитовой провинции Ляонин в основном более низкохромистые (51,0–58,16  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в них составляет 3,17–12,90, а  $\text{TiO}_2$  не превышает 2,44. Некоторые образцы принадлежат к алмазной ассоциации (рис. 2, в).

Многие хромшпинелиды в кимберлитах Китая характеризуются химической зональностью и на-

личием реакционных каемок. В реакционной кайме одного зерна хромшпинелида установлено увеличено содержание  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и уменьшено  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В других случаях в составе каемок повышается количество  $\text{TiO}_2$  и снижается  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Установлено [Каминский, 1988], что по сравнению с хромшпинелидами из Якутии отличительная особенность хромшпинелидов из кимберлитов Китая — повышенное содержание  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , а также относительно высокая концентрация  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . В этом отношении, а также по наличию зональности они близки к хромшпинелидам из кимберлитов Архангельской области [Богатиков и др., 1999]. Еще одна особенность некоторых описываемых хромшпинелидов — низкое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 2%) при высокой хромистости. В то же время хромшпинелиды алмазной ассоциации из кимберлитов Китая имеют более высокое содержание  $\text{TiO}_2$  (рис. 2).

На основании проведенных исследований выявлены различия в распространенности хромшпинелидов различных химико-генетических групп для высокоалмазоносных кимберлитов провинции Шандун и алмазоносных кимберлитов провинции Ляонин и неалмазоносных кимберлитов (рис. 2, в). Присутствие высокотитанистых и высокожелезистых хромшпинелидов (11- и 12-я группы) отличает кимберлиты провинции Ляонин от кимберлитов провинции Шандун. Группы 11-я и 12-я в провинции Шандун не установлены. Кроме того, в отличие от провинции Шандун, в провинции Ляонин не установлена 2-я группа ХГК. В провинциях Шандун и Ляонин не выявлены хромшпинелиды из 5-й и 6-й групп ХГК. Отметим широкое распространение хромшпинелидов из алмазоносных пород (группы 1–3) в высокоалмазоносных кимберлитах провинции Шандун. 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 [Haggerty, 1975; Mitchell, 1995]. Высокоглиноземистые разновидности установлены только в неалмазоносных кимберлитах.

Выполнено 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. М.В. Ломоносова и месторождение им. В. Гриба [Богатикови др., 1999]. На основании единой химико-генетической классификации мы сравнили распределение хромшпинелидов в кимберлитах Китая и ААП. Установлено, что хромшпинелиды из провинции Шандун — на минералы из алмазоносных кимберлитов Золотицкого поля (месторождение им. М.В. Ломоносова); хромшпинелиды из провинции Ляонин похожи на минералы из слабоалмазоносных

пород Верхотинского поля; хромшпинелиды из неалмазоносных кимберлитов Хуабэй — на минералы из неалмазоносных кимберлитов Кепинской группы тел; в Хуабэй нет аналогов хромшпинелидов из трубки им. В. Гриба.

**Микрокристаллические шпинелиды из связующей массы кимберлитов.** Минералы связующей массы кимберлитов Китая изучены недостаточно, тогда как исследования, проведенные в РФ [Бовкун, 2000], показывают, что такие данные несут важную генетическую информацию. Многообразие составов оксидных фаз, их количество и соотношение отражают глубину, динамику становления, изменения *PT*-параметров, окислительной обстановки и химизма минералообразующей среды в процессе эволюции кимберлитовых систем. 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-й химико-генетических групп является необходимым условием алмазоносности кимберлитовых пород. Наиболее ранние оксидные минералы связующей массы кимберлитов для неалмазоносных тел — среднехромистые пикроферрихромиты (4-я ХГГ), характеризующиеся средним содержанием  $Cr_2O_3$  (< 40) и высоким  $TiO_2$  (>7). Шпинелиды 5–10-й групп, характерной особенностью которых является высокое содержание титана при закономерном уменьшении хрома, отражают длительность эволюции и динамики подъема кимберлитовых расплавов. Их количество и разнообразие коррелируют с фазами внедрения сложнопостроенных трубок. Шпинелиды 11–15-й групп кристаллизуются на последних стадиях эволюции кимберлитовых расплавов при постепенном уменьшении титана в кимберлитовой матрице вплоть до кристаллизации магнетита.

Рассмотрим результаты изучения образцов кимберлитов (табл. 2) из трех алмазоносных трубок: Победа-1 (район Мэн Инь), трубки № 42 и 50 (район Фусянь).

**Трубка № 50 (Бинхай).** Исследованы 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). Первый тип — 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 микронов. Ядра футляровидных

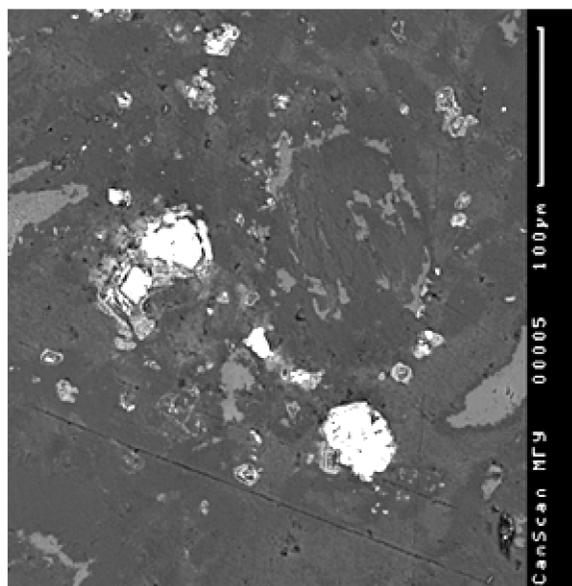
Таблица 2

Электронно-зондовые анализы микрокристаллических шпинелидов из связующей массы кимберлитов Хуабэй

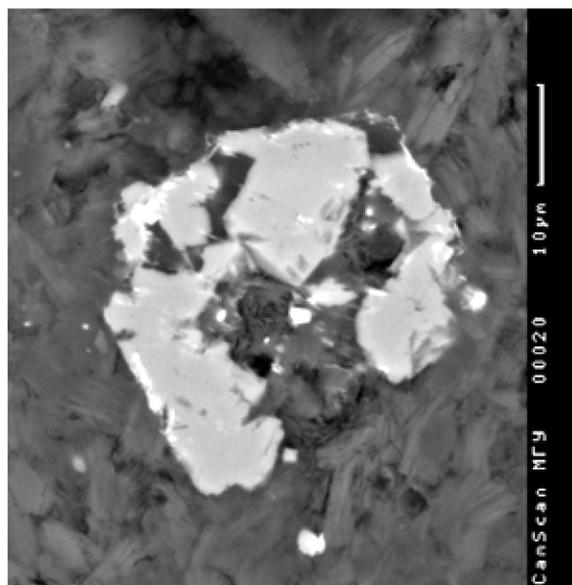
| Номер анализа    | Содержания оксидов, мас.% |                                |                  |                                |      |       |                                | Сумма  |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|--------------------------------|--------|
|                  | MgO                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | FeO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        |
| Образец 50-1     |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
| 50-1/1           | 15,82                     | 5,43                           | 4,91             | 52,46                          | 0,57 | 10,33 | 11,64                          | 101,17 |
| 50-1/2           | 4,92                      | 4,42                           | 5,54             | 24,83                          | 1,14 | 29,99 | 27,85                          | 98,69  |
| 50-1/3           | 1,19                      | 3,28                           | 3,87             | 11,82                          | 0,37 | 40,48 | 38,97                          | 99,99  |
| 50-1/4с          | 15,51                     | 3,55                           | 3,93             | 57,91                          | 0,69 | 9,97  | 9,37                           | 100,94 |
| 50-1/4к          | 2,30                      | 1,44                           | 3,33             | 2,62                           | 0,26 | 41,54 | 48,50                          | 100,00 |
| Образец 42-1     |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
| 42-1/1           | 0,17                      | 0,04                           | 0,85             | 0,08                           | 0,07 | 46,63 | 52,16                          | 100,00 |
| 42-1/3           | 0,95                      | 0,13                           | 2,14             | 0,05                           | 0,16 | 44,83 | 51,75                          | 100,00 |
| 42-1/5           | 13,95                     | 0,22                           | 0,12             | 0,07                           | 0,11 | 27,46 | 58,06                          | 99,99  |
| Образец 42-2     |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
| 42-2/7           | 6,69                      | 4,52                           | 4,48             | 41,67                          | 1,82 | 24,32 | 16,89                          | 100,39 |
| 42-2/9           | 10,67                     | 4,04                           | 4,07             | 51,62                          | 0,59 | 18,32 | 11,88                          | 101,19 |
| 42-2/10          | 12,52                     | 5,59                           | 3,75             | 53,50                          | 0,34 | 15,44 | 9,85                           | 100,99 |
| 42-2/            | 8,98                      | 4,00                           | 4,84             | 50,69                          | 0,86 | 14,65 | 15,50                          | 99,52  |
| Образец 42-3     |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
| 42-3/1с          | 11,17                     | 15,37                          | 0,73             | 48,52                          | 0,51 | 18,53 | 5,76                           | 100,59 |
| 42-3/2с-1        | 12,12                     | 7,67                           | 5,22             | 47,56                          | 0,36 | 16,50 | 11,75                          | 101,18 |
| 42-3/2с-2        | 12,48                     | 11,12                          | 3,71             | 46,58                          | 0,28 | 16,58 | 10,28                          | 101,03 |
| 42-3/2к          | 12,19                     | 6,45                           | 8,13             | 37,95                          | 1,00 | 17,01 | 19,18                          | 101,91 |
| 42-3/4с          | 11,05                     | 14,86                          | 0,80             | 47,01                          | 0,31 | 19,33 | 7,38                           | 100,75 |
| 42-3/5с          | 12,33                     | 13,42                          | 2,86             | 45,78                          | 0,33 | 17,03 | 9,16                           | 100,91 |
| 42-3/5к-1        | 1,03                      | 1,54                           | 6,11             | 16,42                          | 0,77 | 39,33 | 36,77                          | 101,97 |
| 42-3/5к-2        | 0,66                      | 0,94                           | 6,62             | 16,32                          | 0,72 | 39,60 | 36,81                          | 101,66 |
| 42-3/6с          | 11,41                     | 16,27                          | 0,75             | 45,56                          | 0,37 | 18,96 | 7,41                           | 100,73 |
| 42-3/7с          | 11,52                     | 15,61                          | 0,78             | 45,97                          | 0,31 | 18,85 | 7,74                           | 100,78 |
| 42-3/9с          | 22,24                     | 1,65                           | 1,61             | 23,69                          | 0,34 | 9,38  | 41,10                          | 100,00 |
| 42-3/11с         | 11,70                     | 5,37                           | 5,14             | 50,48                          | 0,33 | 16,73 | 11,41                          | 101,15 |
| 42-3/11к         | 14,03                     | 0,65                           | 1,06             | 3,77                           | 0,14 | 26,02 | 54,35                          | 100,01 |
| 42-3/13с         | 11,51                     | 4,05                           | 5,44             | 53,50                          | 0,49 | 16,07 | 9,93                           | 100,98 |
| 42-3/            | 9,96                      | 2,33                           | 1,80             | 62,04                          | 0,36 | 10,4  | 15,01                          | 101,90 |
| Образец Победа-1 |                           |                                |                  |                                |      |       |                                |        |
|                  | 11,88                     | 6,75                           | 2,83             | 55,18                          | 0,37 | 20,31 | 2,69                           | 100,01 |
|                  | 13,75                     | 7,64                           | 3,91             | 53,80                          | 0    | 19,87 | 1,13                           | 100,10 |
|                  | 10,85                     | 3,87                           | 2,97             | 56,65                          | 0,29 | 25,01 | 0,25                           | 99,89  |
|                  | 11,91                     | 4,97                           | 1,91             | 56,27                          | 0,29 | 21,30 | 3,56                           | 100,21 |
| П-1-1-6          | 13,88                     | 9,31                           | 3,58             | 53,79                          | 0,28 | 17,89 | 1,35                           | 100,08 |
| П-1-3-10         | 13,92                     | 5,08                           | 4,06             | 55,07                          | 0,37 | 18,39 | 3,05                           | 99,94  |
| П-1-3-11         | 13,37                     | 8,91                           | 3,33             | 53,95                          | 0,22 | 19,13 | 1,01                           | 99,92  |

образований сложены высокохромистым, титансодержащим пикрохромитом (1-я ХГГ) с высоким содержанием хрома и минимальным титана и окисного железа (57,9  $Cr_2O_3$ ; 15,5 MgO; 3,5  $Al_2O_3$ ; 3,9  $TiO_2$ ; 9,4  $Fe_2O_3$ ). Каймы вокруг таких ядер образованы Al, Mg, Cr-содержащим титаномагнетитом (2,6  $Cr_2O_3$ ; 2,3 MgO; 1,4  $Al_2O_3$ ; 3,3  $TiO_2$ ; 48,5  $Fe_2O_3$ , 12-я ХГГ). Второй тип — гомогенные зерна без кайм, а также

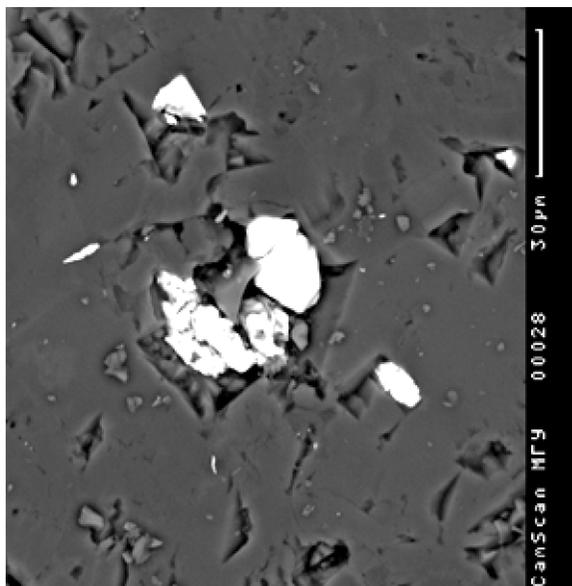
Трубка Победа-1, образец 1



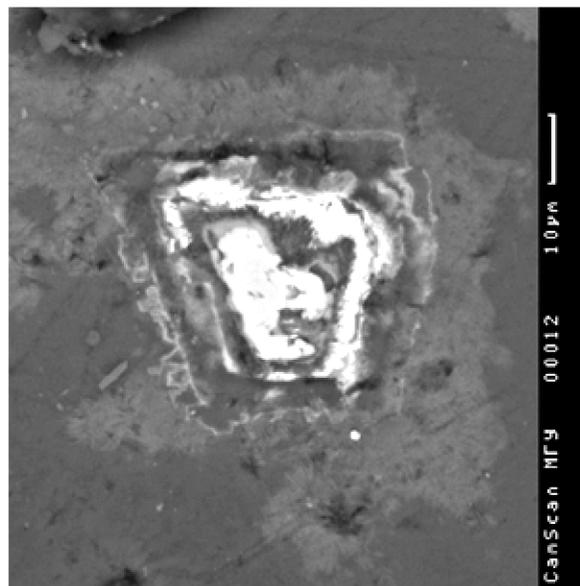
Трубка 42, образец 2



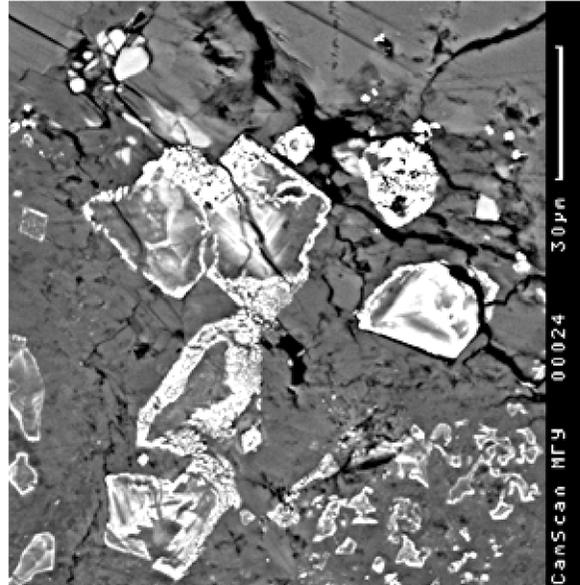
Трубка 50 (Бинхай) образец 2



Трубка Победа-1, образец 3



Трубка 42, образец 3



Трубка 50 (Бинхай) образец 3

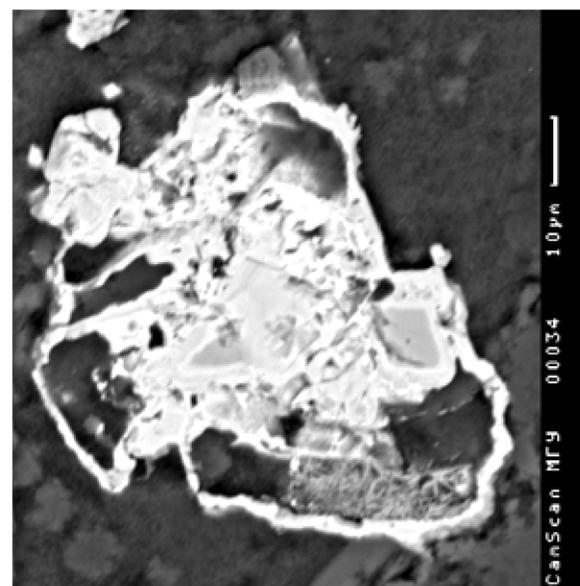


Рис. 3. Структура микрокристаллических оксидов из связующей массы кимберлитов платформ Хуабэй: однородные оторванные кристаллы из первых фаз внедрения (верхний ряд) и коробчатые неоднородные кристаллы (нижний ряд), характерные для завершающих стадий. Изображения в отраженных электронах

зерна, по краям 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 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 15,8 MgO; 5,4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4,9 TiO<sub>2</sub>; 11,6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); низкохромистый пикроферриферрохромит (24,8 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4,9 MgO; 4,4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 5,5 TiO<sub>2</sub>; 27,9 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и высокохромистый титаномагнетит (11,8 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,2 MgO; 3,3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3,9 TiO<sub>2</sub>; 39 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Состав микрокристаллических шпинелидов варьирует в широких пределах (рис. 4). Пикрохромиты, отвечающие наиболее ранним стадиям кристаллизации кимберлитового расплава, характеризуются очень высокой хромистостью и сравнительно низким содержанием титана и окисного железа (52,5–57,9 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3,9–4,9 TiO<sub>2</sub>; 9,4–11,6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Такие пикрохромиты характерны для связующей массы высокомагнезиальных кимберлитов в ураганно-алмазоносных трубках 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 *PT*-параметрах, в условиях низкого окислительно-восстановительного потенциала минералообразующей среды. Широкая распространенность пикрохромитов с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >54 — показатель значительной глубины зарождения и, следовательно, высокой потенциальной алмазоносности кимберлитового расплава, формирующего породу.

Особенности эволюционного тренда изменения составов шпинелидов из связующей массы изученной породы свидетельствуют, что кристаллизация шпинелидов происходила в широком диапазоне скачкообразно изменяющихся *PT*-параметров и окислительного потенциала минералообразующей среды при очень низкой активности титана. Повышенное содержание магния в высокохромистых пикрохромитах (15,5–15,8 MgO) характеризует высокомагнезиальный характер кимберлитового расплава на ранних стадиях его эволюции. Скачкообразное изменение *PT*-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 (образцы 50-2 и 50-3) шире представлены зональные футляровидные выделения. Выделения хромшпинели имеют изъеденные контуры, появляется много сульфидов, а также сильно люминесцирующих редкоземельных минералов. В кимберлитах последних фаз присутствуют лишь реликты хромита, основным минералом становится рутил, т.е. условия для сохранности алмаза становятся неблагоприятными.

**Трубка № 42.** Изучены образцы трех фаз внедрения. В образце 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. Микрокристаллические 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 появляются ажурные оторочки мощностью до 20 мкм, состоящие из практически беспримесного магнетита. Титаномагнетит (93,6 мол.% FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) характеризуется низким содержанием титана и магния (2,1 TiO<sub>2</sub>; 0,95 MgO). Mg-магнетит отличается очень высоким содержанием магния (13,95 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 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,97 ZrO<sub>2</sub>) и отсутствием редкоземельных элементов.

В образце 42-2 микрокристаллические оксидные минералы представлены шпинелидами и рутилом. *Ильменит и перовскит не обнаружены*. Шпинелиды представлены главным образом хромистыми разновидностями: высокохромистым (2-я ХГГ) Ti-содержащим пикрохромитом (51,6–53,5 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10,7–12,5 MgO; 4–5,6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3,8–4,1 TiO<sub>2</sub>; 0,3–0,6 MnO; 15,4–18,3 FeO; 9,9–11,9 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и среднехромистым (3-я ХГГ) Ti-содержащим пикрохромитом (41,7 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 6,7 MgO; 4,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4,5 TiO<sub>2</sub>; 1,8 MnO; 24,3 FeO; 16,9 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Особенности составов этих последовательно кристаллизующихся хромшпинелидов показывают, что по мере снижения значений *PT*-параметров и кристаллизации менее хромистых разновидностей содержание магния в них заметно уменьшалось, а титана, марганца, двух- и трехвалентного железа, напротив, заметно увеличивалось. Описанные пикрохромиты

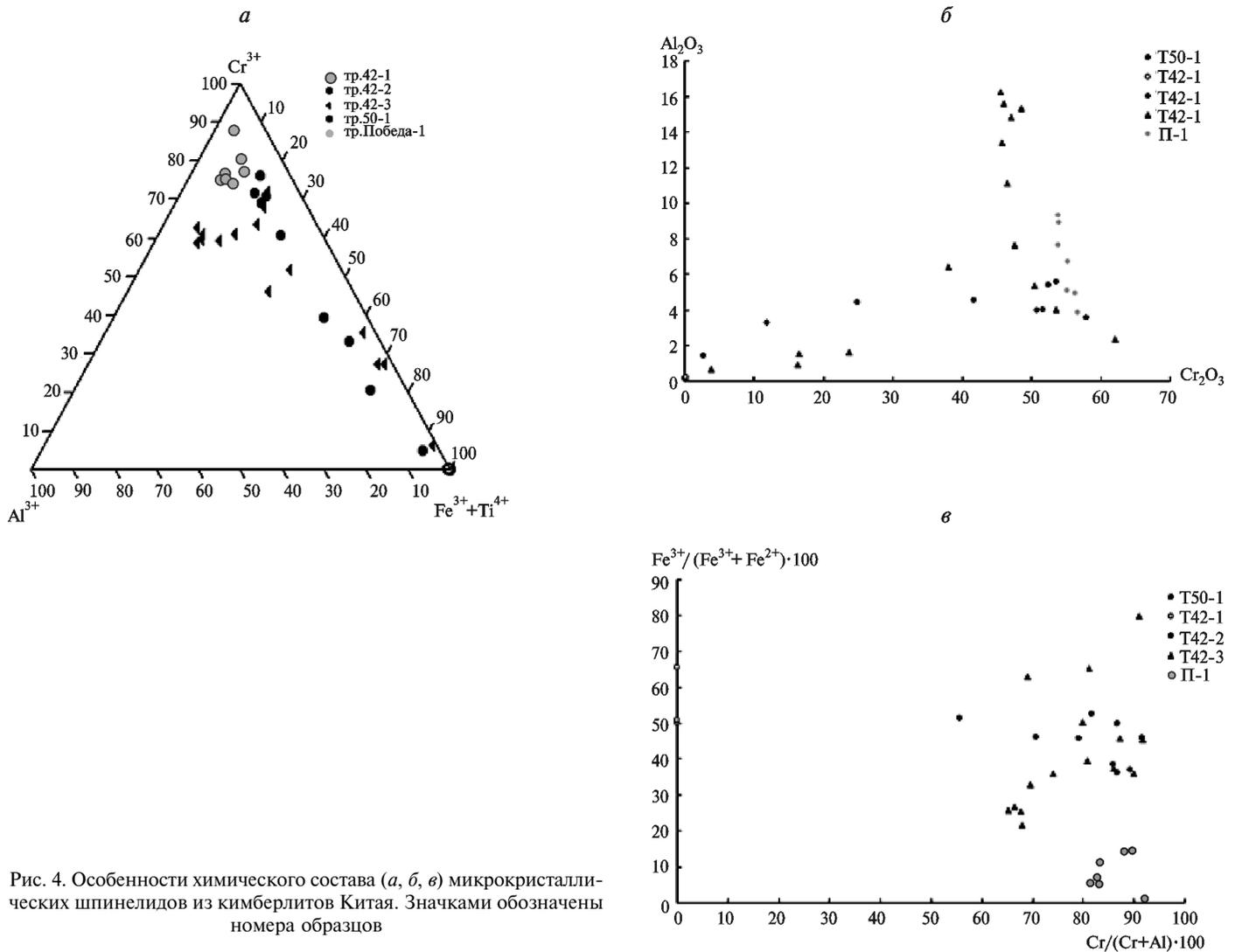


Рис. 4. Особенности химического состава (а, б, в) микрокристаллических шпинелидов из кимберлитов Китая. Значками обозначены номера образцов

слагают идиоморфные зерна размером от 5 до 40 мкм, по краям 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 ( $99,2 \text{ TiO}_2$ ) образует гомогенные зерна неправильной формы, в малом количестве присутствует примесь железа ( $0,4\text{--}0,8 \text{ FeO}$ ).

В образце 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 ( $50,5\text{--}53,5 \text{ Cr}_2\text{O}_3$ ;  $11,5\text{--}11,7 \text{ MgO}$ ;  $4,1\text{--}5,4 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ;  $5,1\text{--}5,4 \text{ TiO}_2$ ;

$16,1\text{--}16,7 \text{ FeO}$ ;  $9,9\text{--}11,4 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ). На изображениях в отраженных электронах (рис. 4) краевые участки пикрохромитовых ядер обычно более светлые и яркие, что позволяет предполагать увеличение количества 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 ( $3,8 \text{ Cr}_2\text{O}_3$ ;  $14 \text{ MgO}$ ;  $0,7 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ;  $1,1 \text{ TiO}_2$ ;  $54,4 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ), в компонентном составе которого ведущая роль принадлежит магнезиоферритовому и магнетитовому миналам ( $59,7 \text{ мол.}\% \text{ MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $31,2 \text{ мол.}\% \text{ FeFe}_2\text{O}_4$ ). Рутил ( $96,5\text{--}97,6 \text{ TiO}_2$  и  $0,9\text{--}1,6 \text{ FeO}$ ) 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) с размерами  $3 \times 4 \text{ мм}$ , 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 этого 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 MgO; 14,9–16,3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 45,6–48,5 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,7–0,8 TiO<sub>2</sub>; 18,5–19,3 FeO; 5,8–7,7 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

В соответствии с химико-генетической классификацией хромшпинелидов ультраосновного парагенезиса из кимберлитов [Богатиков и др., 1999] их состав схож с таковым среднехромистых хромшпинелидов из лерцолитов. Однако изученные нами хромшпинелиды отличаются более низким содержанием Mg и Al и более высоким двухвалентного железа. В сильнодеформированном и трещиноватом (изломанном) зерне флогопита, находящемся в центральной части сферического образования, наблюдаются выделения шпинелидов, образующие цепочки из идиоморфных и неправильных, часто трещиноватых зерен (размер от 15 до 170 мкм), расположенных вдоль трещин. Центральные участки таких зерен представлены Ti-содержащим пикрохромитом (12,1–12,5 MgO; 7,7–13,4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 45,8–47,6 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2,9–5,2 TiO<sub>2</sub>; 0,3–0,4 MnO; 16,5–17,0 FeO; 9,2–11,8 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), отличающимся от описанных выше пикроалюмохромитов более высоким содержанием титана и окисного железа и меньшим алюминия.

В одном из крупных зерен установлена зональность. От центра к краю содержание хрома и алюминия уменьшается, а титана, окисного железа и марганца увеличивается (12,2 MgO; 6,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 37,9 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 8,1 TiO<sub>2</sub>; 1,0 MnO; 17,1 FeO; 19,2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Вокруг других крупных зерен наблюдаются прерывистые футляровидные каймы толщиной до 25 мкм, состоящие из высокохромистого титаномагнетита (0,7–1 MgO; 0,9–1,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 16,3–16,4 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 6,1–6,6 TiO<sub>2</sub>; 0,7–0,8 MnO; 39,3–39,6 FeO; 36,7–36,8 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 MgO; 1,7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 23,7 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,6 TiO<sub>2</sub>; 0,3 MnO; 9,4 FeO; 41,1 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 мол.% 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>.

**Трубка Победа-1.** Изучены образцы трех фаз внедрения. В образце Победа-1-1 выявлены следующие типы микрокристаллических оксидов: 1) шлировые выделения, образованные при замещении силикатов;

2) отдельные хорошо ограненные зерна квадратных очертаний; 3) неправильной формы выделения с изъеденными краями и отчетливо проявленной зональностью. Изучение фазового состава рудных минералов показало, что преобладающая оксидная фаза — *перовскит*. Отношение перовскита к хромиту составляет 10:1. В образце есть сульфиды, которые составляют значительную часть рудных вкрапленников. Хромшпинелиды отличаются высоким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (53,8–54,8) и MgO (13,88–14,01), т.е. по составу отвечают алюмомагнитохромиту. Перовскиты характеризуются значительной примесью железа (до 1,88 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и церия (до 4,3 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 образцах Победа-1-2 и Победа-1-3, 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 обр. Победа-1-1, в хромитах увеличивается содержание железа и уменьшается хрома, что видно на диаграммах, представленных на рис. 4, т.е. условия кристаллизации этих кимберлитов были более окислительными и щелочными.

**Заключение.** По особенностям химического и фазового состава хромшпинелидов установлена длительная и сложная эволюция кимберлитов платформы Хуабэй, которая 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 провинции Шандун присутствует много хромшпинелидов из высокоалмазоносных дунитов, гарцбургитов и лерцолитов (парагенезис 1-й и 3-й ХГГ). В среднеалмазоносных кимберлитах провинции Ляонин меньше хромшпинелидов из парагенезиса 1-й и 3-й ХГГ, но еще значительно содержание среднехромистых шпинелидов из лерцолитов (парагенезис 4-й ХГГ). В неалмазоносных кимберлитах платформы Хуабэй много низкохромистых шпинелидов из лерцолитов (3-я и 5-я ХГГ).

Во всех телах среди минералов связующей массы *отсутствует пикроильменит*, а от первой фазы внедрения к третьей увеличиваются 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: к краям зерен увеличивается содержание Fe и уменьшается Cr. Последние фазы со-

держат магнетит, специфические люминесцирующие минералы и фазы, содержащие  $H_2O$ , в них много перовскита и сульфидов.

Сопоставляя полученные результаты с данными по Якутии [Бовкун, 2000; Серов, 2002], можно сделать вывод, что только кимберлиты трубки Победа-1 (провинция Шандун) содержат ультравысокохромистые пикрохромиты из кимберлитов с уникальной, высокой и средней алмазоносностью. Микрокристаллические шпинелиды в трубках № 50 и № 42 типоморфны для кимберлитов Mg–Fe–Ti–типа высокой, средней и низкой алмазоносности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бао Яньнань.* Минералогия алмазных месторождений Китая: Автореф. канд. дис. М., 1991.

*Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А.* и др. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999.

*Бовкун А.В.* Минералогия оксидов из связующей массы кимберлитов Якутии (генетические и прикладные аспекты): Автореф. канд. дис. М., 2000.

*Ваганов В.И.* Алмазные месторождения России и мира. М.: Геоинформмарк, 2002.

*Гринсон А. С., Дун Цзунь Ин.* Кимберлитовый магматизм и структура литосферы Китайской платформы // Докл. АН СССР. 1984. Т. 276, № 4.

*Доусон Дж.* Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983.

*Каминский Ф.В.* Кимберлиты и алмазы Китайской Народной Республики. М.: Недра, 1988.

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

Полные кристаллизационные тренды шпинелидов и присутствие зональных негомогенных зерен свидетельствуют о невысокой скорости подъема кимберлитового расплава к поверхности и постепенном увеличении окислительного потенциала среды минералообразования. Такие условия неблагоприятны для сохранности алмаза. Таким же неблагоприятным фактором является и присутствие перовскита, который характерен для связующей массы низко- и неалмазоносных пород Кепинского поля ААП [Богатиков и др., 1999] и Куонамского района Якутии [Серов, 2002].

*Лу Фэнсян, Чи Цзишан, Чжао Лэй.* Кимберлиты в платформе Хуабэй. Пекин: Изд-во геологии, 1996 (на кит. языке).

*Ма Синхенг.* Основы тектоники Китая. Пекин: Изд-во геологии, 1983 (на кит. языке).

*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.

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

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

*Haggerty S.E.* The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlite // Phys. Chem. Earth. 1975. Vol. 9. P. 295–307.

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

Поступила в редакцию  
20.10.2009