

УДК 549.322; 552.163

## ПИРРОТИН, ПЕНТЛАНДИТ И ХИББИНГИТ ИЗ МЕТАКИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ УДАЧНАЯ-ВОСТОЧНАЯ, СЕВЕРНАЯ ЯКУТИЯ

Е.А. Соколова

УРАН Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, [mineral@fmm.ru](mailto:mineral@fmm.ru)

С.А. Воробьев

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, [mineral@geol.msu.ru](mailto:mineral@geol.msu.ru)

Кимберлиты многочисленных трубок и даек дотраппового возраста Восточно-Сибирской платформы большей частью содержат заметное количество серпентина — лизардита, с которым ассоциируют кальцит, доломит, амакинит или брусит, магнетит, гётит, пирит, кварц, халцедон, данит, амethyst, минералы группы гидроталькита, целестин, стронцианит, некоторые рудные минералы. Данный парагенез указывает на то, что эти тела были в той или иной степени захвачены низкоградным метаморфизмом в условиях цеолитовой фации. Обычно процессы регионального низкоградного метаморфизма проходят при повышенном окислительном потенциале, при этом в метакимберлитах формируются гётит или магнетит. В трубке Удачная-Восточная встречаются участки почти не метаморфизованных кимберлитов, а среди измененных кимберлитов можно встретить такие, в которых практически нет гётита и магнетита, но немало метаморфогенных пирротина и пентландита. Пирротин и пентландит изученных образцов тесно ассоциируют с Cl-содержащим лизардитом и магнизальным хиббингитом ( $\text{Fe}_{1.53}^{2+}\text{Mg}_{0.42}\text{Mn}_{0.03}^{2+}$ ) $_{2.00}(\text{OH}_{2.88}\text{Cl}_{0.12})_{3.00}\text{Cl}_{1.00}$ . Присутствие хиббингита подтверждает наше предположение о том, что изменения данных кимберлитов под воздействием процессов низкоградного метаморфизма происходили при участии флюидов с высокой концентрацией хлора, источником которого явились хлоридные рассолы из эвапоритов, присутствующих в карбонатно-терригенном комплексе, вмещающем кимберлитовую трубку Удачная-Восточная.

Состав изученного пирротина высоко железистый, близок к FeS, такие пирротины немагнитны. Отметим, что описываемые метакимберлиты не содержат магнитных минералов. Средний состав пентландита отвечает  $(\text{Ni}_{4.0}\text{Fe}_{4.5}\text{Co}_{0.5})_{9.0}\text{S}_{8.0}$ , соотношение в нём никеля к кобальту устойчивое и составляет от 7.7 до 9.9, что близко к соотношению никеля к кобальту в первичных кимберлитах и в оливине кимберлитов. По-видимому, источником Fe, Ni и Co для пирротина и пентландита был оливин, источником сульфидной серы были вмещающие ангидрит-содержащие карбонатно-терригенные породы раннего палеозоя, местами пропитанные битумами, в которых часто присутствуют сернистые соединения.

В статье 3 рисунка, 2 таблицы, список литературы из 16 названий.

Ключевые слова: метакимберлиты, пирротин, пентландит, Cl-содержащий лизардит, магнизальный хиббингит, низкоградный региональный метаморфизм, трубка Удачная-Восточная.

Породы, которыми сложены многочисленные кимберлитовые трубки и дайки Сибирской платформы, в той или степени изменены. В пределах одной трубки участки, сложенные свежими, практически не измененными кимберлитами могут соседствовать с интенсивно или даже полностью измененными породами. Такие кимберлиты содержат заметное количество серпентина — лизардита, с которым ассоциируют кальцит, доломит, амакинит или брусит, магнетит, гётит, пирит, кварц, халцедон, амethyst, смектиты, минералы группы гидроталькита, целестин, стронцианит, некоторые рудные минералы. По нашим данным, эти изменения обусловлены метаморфогенно-гидротермальными процессами, порожденными послетрапповым региональным метаморфизмом в условиях цеолитовой фации (Соколова, Спиридонов, 2006; 2007; Соколова и др., 2010).

Главной особенностью низкоградного регионального метаморфизма является неоднородность его проявления. Это флюидодоминирующий процесс; наиболее интенсивные

изменения первичных пород отмечаются там, где обильны флюидопроводники (поры и трещины). Метаморфогенные флюиды, как правило, обладают высоким окислительным потенциалом, их состав определяется подвижными компонентами вмещающих пород и собственно кимберлитов.

Кимберлиты трубки Удачная-Восточная и вмещающие трубку породы раннего палеозоя, представляющие собой ангидрит-содержащие доломиты с линзами эвапоритов, местами пропитанные битумами, содержащими сернистые соединения, крайне неравномерно захвачены процессами низкоградного метаморфизма. Наряду с практически свежими кимберлитами, в которых присутствуют такие мало устойчивые минералы, как шортит, можно встретить и полностью измененные породы. Размер участков интенсивно измененных кимберлитов варьирует от небольших гнезд до нескольких десятков метров. По вкрапленникам первичного оливина образуются псевдоморфозы карбонатного, карбонат-серпентинового, са-

**Таблица 1. Химический состав перовскита (1), ильменита (2), пикроильменита (3) и титаномагнетита (4) из метакимберлитов трубки Удачная-Восточная**

Компоненты (мас.%)	1	2	3	4
CaO	36.02	—	—	—
MgO	—	—	13.19	10.83
FeO	3.10	44.19	24.35	46.19
MnO	—	2.97	3.38	0.79
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	25.73
TiO <sub>2</sub>	53.12	50.99	55.87	10.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	3.19
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.79	0.86	—	—
Сумма	97.03	99.01	96.79	96.93
Количество атомов в формуле, расчет на сумму катионов				
Ca	0.93	—	—	—
Mg	—	—	0.46	0.55
Fe <sup>2+</sup>	0.06	0.94	0.47	0.43
Mn	—	0.06	0.07	0.02
Fe <sup>3+</sup>	—	0.01	0.01	0.91
Cr	—	—	—	0.70
Ti	0.96	0.98	0.99	0.26
Al	—	—	—	0.13
Nb	0.05	0.01	—	—
Сумма	2	2	2	3

*Примечание:* анализы выполнялись в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН на электронном микроскопе JСХА-50А фирмы JEOL. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, энергодисперсионный спектрометр, ток зонда 20 нА. Эталоны: ильменит USNM 96189 (Fe, Ti, Mn), металлический Nb, омфацил USNM 110607 (Ca, Mg, Al), хромит USNM 117075 (Cr). Изображения препаратов были получены на приборе CamScan-4D. Аналитик А.А. Агаханов.

понитового, тальк-карбонатного состава; цементирующая масса превращается в мелкозернистые агрегаты карбонат-серпентинового состава с пластинками флогопита и тетраферрифлогопита, которые частично или полностью замещаются хлоритовыми минералами, карбонатами, вермикулитом, корренситом. В цементирующей массе присутствует редкая вкрапленность ильменита, перовскита, в разной степени замещенных титанитом; отдельные зерна апатита, новообразованные рудные минералы и т.д. (Лебедев, 1963; Милашев, 1963; Бобриевич и др., 1964; Францессон, 1968; Никишова и др., 1978; Корнилова и др., 1981; Подвысоцкий и др., 1981; Маршинцев и др., 1984; Егоров и др., 1991; Зинчук, 2000; Соколова, Спиридонов, 2006; Соколова и др., 2010). Сульфиды образуют в основной массе измененных кимберлитов мелкую неоднородную вкрапленность или, в ассоциации с карбонатами, обособляются по трещинам гидроразрыва в виде гнезд и прожилков. Наиболее распространены сульфиды Fe: пирит, пирротин, марказит, грей-

гит; по некоторым данным, содержание пирита на отдельных участках измененных кимберлитовых трубок и даек достигает 1–2%. Существенно реже встречаются галенит, сфалерит, халькопирит, пентландит, миллерит, макинавит, точилинит и другие сульфиды. Их краткое описание и единичные анализы приводились в ряде работ, посвященных минералам измененных кимберлитов (Илупин, 1962; Илупин и др., 1990; Зинчук, 2000), однако вопросы генезиса этих минералов, как правило, оставались за рамками исследований.

Нами изучен материал керна с глубины 430 м, представляющего собой контакт кимберлитов трубки Удачная-Восточная с вмещающими доломит-содержащими породами. Кимберлиты заметно изменены, но в них присутствует масса мелких реликтов исходных пород. По контакту отмечается тонкозернистая зона закалки шириной 0.1–0.7 мм. В узкой приконтактной зоне проявлена субпараллельная ориентировка удлиненных вкрапленников оливина и табличек флогопита. Оливин в изученных образцах полностью изменен; по нему развиваются петельчатые или пластинчатые псевдоморфозы лизардита с тонкими включениями доломита и кальцита; по краевым частям псевдоморфоз развивается бахромчатый сапонит (Соколова и др., 2010). Основная масса состоит из метаморфогенного кальцита, сапонита, частично замещенных корренситом табличек флогопита с отдельными зернами апатита и реликтами Nb-содержащего перовскита ( $\text{Ca}_{0.93}\text{Fe}_{0.06}^{2+}\text{Nb}_{0.01}^{2+}$ )<sub>1.00</sub>(Ti<sub>0.96</sub>Nb<sub>0.04</sub>)<sub>1.00</sub>O<sub>3.00</sub>, Nb-содержащего ильменита ( $\text{Fe}_{0.94}^{2+}\text{Mn}_{0.06}$ )<sub>1.00</sub>(Ti<sub>0.98</sub>Fe<sub>0.01</sub>Nb<sub>0.01</sub>)<sub>1.00</sub>O<sub>3.00</sub>, пикроильменита ( $\text{Mg}_{0.46}\text{Fe}_{0.47}^{2+}\text{Mn}_{0.07}$ )<sub>1.00</sub>(Ti<sub>0.99</sub>Fe<sub>0.01</sub>)<sub>1.00</sub>O<sub>3.00</sub> (табл. 1), новообразованными пирротинном и пентландитом.

Пирротин образует редкую вкрапленность в цементирующей массе метакимберлитов (рис. 1). Его состав, определённый по 10 зернам (табл. 2), показывает, что он практически не содержит примесей, является высокожелезистым и отвечает формуле Fe<sub>0.982</sub>S<sub>1.000</sub> (до Fe<sub>0.984</sub>S<sub>1.000</sub>). Находки высокожелезистого пирротина в ассоциации с макинавитом отмечались в трубке Удачной-Западной (Илупин и др., 1990).

Высокожелезистый пирротин практически немагнитен. Его состав показывает, что активность серы во флюиде, которая в первую очередь связывается железом, была невысока. На приведенном рисунке пирротин находится в сростании с первичным высокохромистым магнезиальным титаномагнетитом состава ( $\text{Mg}_{0.55}\text{Fe}_{0.43}^{2+}\text{Mn}_{0.02}$ )<sub>1.00</sub>(Cr<sub>0.70</sub>Al<sub>0.13</sub>Fe<sub>0.91</sub><sup>3+</sup>Ti<sub>0.26</sub>)<sub>2.00</sub>O<sub>4.00</sub>

Таблица 2. Химический состав пирротина (1–10) и пентландита (11–16) из метакимберлитов трубки Удачная-Восточная

Компоненты (%)	Fe	Ni	Co	S	Сумма	Формула	Ni/Co
1	62.16	—	—	36.29	98.45	Fe <sub>0.983</sub> S <sub>1.000</sub>	—
2	62.69	—	—	36.79	99.48	Fe <sub>0.980</sub> S <sub>1.000</sub>	—
3	62.53	—	—	36.48	99.01	Fe <sub>0.984</sub> S <sub>1.000</sub>	—
4	62.33	—	—	36.38	98.71	Fe <sub>0.983</sub> S <sub>1.000</sub>	—
5	61.78	—	—	36.11	97.89	Fe <sub>0.982</sub> S <sub>1.000</sub>	—
6	62.56	—	—	36.60	99.16	Fe <sub>0.981</sub> S <sub>1.000</sub>	—
7	61.71	0.01	—	35.98	97.70	Fe <sub>0.905</sub> S <sub>1.000</sub>	—
8	62.12	—	—	36.33	98.45	Fe <sub>0.981</sub> S <sub>1.000</sub>	—
9	61.77	—	—	36.10	97.87	Fe <sub>0.982</sub> S <sub>1.000</sub>	—
10	62.09	0.01	—	36.28	98.38	Fe <sub>0.982</sub> S <sub>1.000</sub>	—
11	32.98	31.07	3.18	34.13	101.36	(Ni <sub>4.02</sub> Fe <sub>4.49</sub> Co <sub>0.41</sub> ) <sub>8.92</sub> S <sub>8.08</sub>	9.8
12	32.80	30.93	3.20	34.10	101.03	(Ni <sub>4.01</sub> Fe <sub>4.48</sub> Co <sub>0.41</sub> ) <sub>8.90</sub> S <sub>8.10</sub>	9.8
13	32.55	30.38	3.96	33.16	100.05	(Ni <sub>4.00</sub> Fe <sub>4.50</sub> Co <sub>0.52</sub> ) <sub>9.02</sub> S <sub>7.98</sub>	7.7
14	32.48	30.35	3.87	33.89	100.59	(Ni <sub>3.96</sub> Fe <sub>4.45</sub> Co <sub>0.50</sub> ) <sub>8.91</sub> S <sub>8.09</sub>	7.9
15	31.92	31.56	3.43	33.50	100.41	(Ni <sub>4.13</sub> Fe <sub>4.39</sub> Co <sub>0.45</sub> ) <sub>8.97</sub> S <sub>8.03</sub>	9.2
16	32.78	30.21	3.11	34.02	100.12	(Ni <sub>3.95</sub> Fe <sub>4.51</sub> Co <sub>0.40</sub> ) <sub>8.86</sub> S <sub>8.14</sub>	9.9

Примечание: формулы пирротина рассчитаны на S = 1; формулы пентландита — на сумму компонентов, равную 17. Анализы выполнялись в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН на электронном микрозонде JCXA-50A фирмы JEOL. Условия анализа аналогичны указанным в табл. 1. Эталоны: ильменит USNM 96189 (Fe), металлический Co, NiO (Ni), барит (S). Изображения препаратов были получены на приборе CamScan-4D. Аналитик А.А. Агаханов.

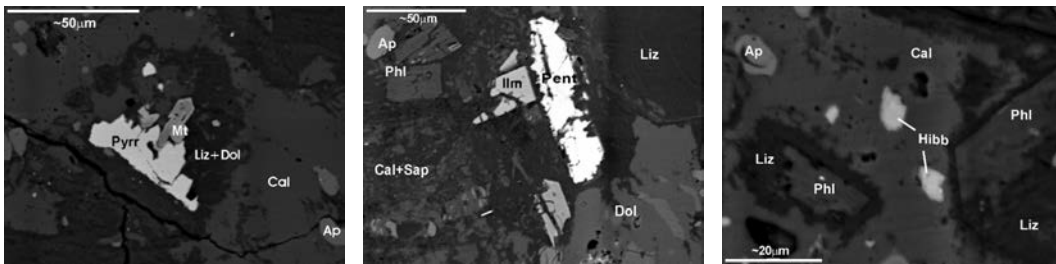


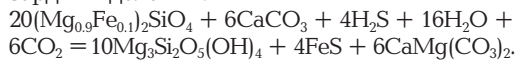
Рис. 1. Метаморфогенный пирротин (Pyrr) в сростании с высокохромистым магнетальным титаномангнетитом (Mt) в полностью измененном вкрапленнике оливина, замещенного лизардит-голомитовым агрегатом (Liz+Dol) в окружении кальцита (Cal) с отдельными зернами апатита (Ap). В отраженных электронах (BSE).

Рис. 2. Кристалл метаморфогенного пентландита (Pent) с кальцитом (Cal), флогопитом (Phl), ильменитом (Ilm), апатитом (Ap) в карбонат-лизардитовом (Dol, Cal) и кальцит-сапонитовом (Cal+Sap) агрегате. В отраженных электронах (BSE).

Рис. 3. Магнезиальный хиббингит (Hibb) в кальците (Cal) с флогопитом (Phl), лизардитом (Liz), апатитом (Ap). В отраженных электронах (BSE).

(табл. 1), с железистостью  $f = 56.3$ . Эти минералы находятся на месте полностью измененного вкрапленника оливина, замещенного лизардит-доломитовым агрегатом.

Процесс формирования пирротина мог протекать согласно приведенной ниже реакции с участием магматического кальцита; продуктами помимо пирротина являлись лизардит и доломит:



Пентландит в изученных метакимберлитах встречается существенно реже, он образует кристаллы в цементирующей массе (рис. 2). Состав пентландита определялся по 6 зернам (табл. 2), колебания состава незначительны, содержания примесей ниже чувстви-

тельности метода. Средний состав пентландита в пересчете на формулу:  $(\text{Ni}_{4.0}\text{Fe}_{4.5}\text{Co}_{0.5})_{9.0}\text{S}_{8.0}$ , соотношение в нём никеля к кобальту устойчивое и составляет от 7.7 до 9.9, что близко к соотношению никеля к кобальту в первичных кимберлитах и в оливине кимберлитов (Бармина, Френкель, 1981). По-видимому, источником Fe, Ni и Co для пирротина и пентландита был оливин. Эти компоненты вследствие малой подвижности не выносились, а были задействованы в формировании новообразований in situ. Источником сульфидной серы могли быть вмещающие ангидрит-содержащие карбонатно-терригенные породы раннего палеозоя, местами пропитанные битумами, в которых часто присутствуют сернистые соединения.

Пара пентландит — миллерит является геотермометром; отсутствие миллерита в изученном образце указывает на температуры образования ассоциации выше 250°C, то есть в высокотемпературной части цеолитовой фации.

Мы полагаем, что описанные пирротин и пентландит сформировались под воздействием метаморфогенных флюидов с умеренной активностью S<sub>2</sub> и низкой O<sub>2</sub>. О последнем свидетельствует отсутствие в изучаемых породах новообразованного магнетита, типичного минерала измененных кимберлитов. Содержание в этих флюидах ионов S<sup>2-</sup> было невысоким, в противном случае формировался бы пирит. Следует добавить, что при проведении магнитометрических исследований кимберлитов необходимо принимать во внимание возможное отсутствие в них магнитных минералов, как это было показано выше.

Нами была отмечена особенность лизардита изученных метакимберлитов — наличие в его составе Cl до 1.9 мас.% (Соколова и др., 2010). При работе с описанным материалом в цементирующей массе метакимберлитов была обнаружена еще одна содержащая хлор фаза (рис. 3): мельчайшие (менее 10 мкм) образования состава, соответствующего магнетитовому хиббингиту. Микронзондовый анализ показал следующие содержания (ат.%): Fe 30.27; Mg 8.17; Mn 0.62; Cl 21.87; рассчитанная по этим данным формула отвечает (Fe<sub>1.55</sub><sup>2+</sup>Mg<sub>0.42</sub>Mn<sub>0.03</sub><sup>2+</sup>)<sub>2.00</sub>(OH<sub>2.88</sub>Cl<sub>0.12</sub>)<sub>3.00</sub>Cl<sub>1.00</sub>. Присутствие этого минерала подтверждает высказанное нами ранее предположение о том, что изменения изучаемых кимберлитов под воздействием процессов низкоградного регионального метаморфизма произошли при участии флюидов с высокой концентрацией хлора, источником которого явились хлоридные рассолы из эвапоритов, линзы и прослойки которых присутствуют в карбонатно-терригенном комплексе, вмещающем кимберлитовую трубку Удачная-Восточная.

Авторы выражают благодарность А.А. Агаханову за качественно выполненные анализы и Э.М. Спиридонову за ценные консультации.

## Литература

- Бармина Г.С., Френкель М.Я. О коэффициентах распределения Ni, Cr, Mn, V, Co в оливинах и пироксенах // Тезисы докл. VII семинара по геохимии магматических пород, Москва. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1981. С. 10.
- Бобривич А.П., Илупин И.П., Козлов И.Т. и др. Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии. М.: Недра. 1964. 192 с.
- Егоров К.Н., Богданов Г.В., Лашкевич В.В., Мегведева Т.И., Тихонова Г.А. Стадийность и физико-химические условия процесса серпентинизации кимберлитов // ЗВМО. 1991. Ч. 120. Вып. 6. С. 1—12.
- Зинчук Н.Н. Постмагматические минералы кимберлитов. М.: Недра. 2000. 538 с.
- Илупин И.П. Распространение и генезис некоторых гидротермальных и гипергенных минералов в кимберлитах Якутии // Сов. геология. 1962. № 3. С. 152—156.
- Илупин И.П., Ваганов В.И., Прокопчук Б.И. Кимберлиты. М.: Недра. 1990. 248 с.
- Корнилова В.П., Никишова Л.В., Никишов К.Н. Минералы группы серпентина из кимберлитовых пород Якутии // Парагенезы минералов кимберлитовых пород, Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР. 1981. С. 65—81.
- Лебедев А.А. О гидротермальной стадии серпентинизации кимберлитов в связи с находкой в них брусита // Петрография и минералогия коренных месторождений алмаза. М.: изд. АН СССР. 1963. Вып. 8. С. 71—86.
- Маршинцев В.К., Никишова Л.В., Готовцев В.В. Серпентин, выполняющий игольчатые каналы в оливине трубки «Удачная-Восточная» // Докл. АН СССР. 1984. Т. 277. С. 697—700.
- Милашев В.А. Парагенетические ассоциации вторичных породообразующих минералов в кимберлитах // Геохимия. 1963. № 6. С. 557—564.
- Никишова Л.В., Алтухова З.А., Никишов К.Н. Электронно-микроскопическое изучение серпентина основной массы цемента кимберлитовых брекчий // Бюлл. НТИ. Якутск: Изд. ЯФ АН СССР. 1978. С. 25—27.
- Подвысоцкий В.Т., Владимиров Б.М., Иванов С.И. и др. О серпентинизации кимберлитов // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256. С. 946—950.
- Соколова Е.Л., Спиридонов Э.М. Парагенез гётита и лизардита — типичное образование метакимберлитов цеолитовой фации и заключенных в них метаперидотитов // Новые данные о минералах. 2006. Вып. 41. С. 86—90.
- Соколова Е.Л., Спиридонов Э.М. Са-содержащий стронцианит, барит, доломит и кальцит в метакимберлитах трубки Зарница, Якутия // Новые данные о минералах. 2007. Вып. 42. С. 158—163.
- Соколова Е.Л., Спиридонов Э.М., Воробьев С.А. Хлорсодержащий лизардит из метакимберлитов трубки Удачная-Восточная, Северная Якутия // Петрология. 2010. Т. 18. № 1. С. 1—5.
- Францесон Е.В. Петрология кимберлитов. М.: Недра. 1968. 191 с.