

Рис. 1. Замещение пирротина (серое) мелкозернистым агрегатом макинавита (светлое и серое разных оттенков) по краям зерен и трещинкам. Полированный шлиф р-663, увел. 165. Трубка Чомур

Условия нахождения макинавита в кимберлитах Якутии. Первое упоминание о макинавите как о валлериитоподобном минерале приводится Н. В. Соболевым, В. А. Вахрушевым (1967), изучавшими сульфиды в пирроповых перидотитах из кимберлитов Якутии. Позднее эти авторы (Вахрушев, Соболев, 1971) пришли к выводу, что описанный ими ранее минерал по оптическим свойствам скорее относится к макинавиту, чем валлерииту, однако выполнить рентгеновские и другие исследования им не удалось, так как он был найден в незначительном количестве и в сростаниях с пентландитом и халькопиритом.

Нами обнаружены мельчайшие выделения макинавита, размером в сотые и тысячные доли миллиметра, в различных кимберлитовых трубках. Он встречается в глубинных ассоциациях, на что справедливо указали В. А. Вахрушев и Н. В. Соболев (1967, 1971), и в более поздних гидротермальных проявлениях. Наиболее детально макинавит изучен в двух трубках: Удачная-Западная и Чомур (Чомурдахское поле).

В глубинных образованиях (образцы из трубки Чомур и др.) макинавит ассоциируется с пирротинном, пентландитом, халькопиритом, джерфишеритом, замещая их, развиваясь по спайности, трещинкам и в виде кайм (рис. 1). В этих случаях он наблюдается в виде мелкозернистых агрегатов, сильно анизотропных и двуотражающих, отдельные зерна которых имеют удлиненные пластинчатые формы. В отдельных образцах наряду с макинавитом наблюдаются валлериит и точилинит, образующие обособленные выделения в массе кимберлита.

Относительно крупные зерна макинавита, размером до 1 мм, найдены только в кимберлите из трубки Удачная-Западная (рис. 2), где он обнаружен в ассоциации с пирротинном и магнетитом, иногда пиритом и марказитом, а также в виде мельчайших самостоятельных выделений в интерстициях породообразующих минералов. В пирит-марказитовом агрегате, а также в пирротине, замещенном магнетитом, зерна макинавита имеют таблитчатые формы, иногда с квадратным сечением. В скрещенных николях видна яркая анизотропия минерала с цветным эффектом анизотропии от бледно-желтого до синевато-серого.

В единичных случаях макинавит встречается в виде прожилков, секущих относительно крупные обособления магнетита.

Химический состав макинавита. Изучение состава макинавита было проведено с помощью рентгеноспектрального микроанализатора «Самеса» MS-46. Рабочее напряжение 20 кВ, ток 15 На, зонд 1—2 мк. Эталоны на S и Fe служили пирротин, синтезированный гидротермальным способом в институте кристаллографии АН СССР Н. Ю. Икорниковой; на Co, Ni, Cu — чистые металлы, на As — никелин, NiAs. Аналитические линии и кристаллы-анализаторы: SK_{α} (PET), FeK_{α} (LiF), NiK_{α} (LiF), CoK_{α} (LiF), AsK_{β} (LiF), CuK_{β} (LiF).

Для исключения погрешности установки образца измерения проводились дважды, с поворотом на 180° . Растровые изображения исследованного участка площадью 300×300 мк получены для K_{α} излучения Fe, Co, Ni; Cu и As — не обнаружены. Чувствительность по Cu, Co $\sim 0,05$ вес. %, по As $\sim 0,5$ вес. %.

Среднее стандартное отклонение составляло 1—2% относительных, расчет поправок на разницу составов образца и эталона производился по программе для ЭВМ БЭСМ-6.

Как видно из табл. 1, изученные зерна из разных образцов близки по химическому составу. Для них характерно содержание никеля от 4,95 до 6,98 вес. % и незначительные количества кобальта — от 0,13 до 0,29 вес. %. Колебания в содержаниях никеля и кобальта от зерна к зерну в одном и различных образцах несущественные. Сканирование одного из анализированных участков показало равномерное распределение никеля и кобальта по их площади (рис. 3). Заметно, хотя и незначительное, увеличение содержания кобальта в зависимости от количества никеля. Иногда некоторое повышение концентрации кобальта отмечается по границам зерен макинавита и пирротина, но содержание кобальта и никеля в макинавите относительно выше, чем в пирротине (табл. 1). Расчет на формулу минерала показал отклонение от стехиометричных отношений Me и S; сумма металлов ($Fe + Ni + Co$) всегда больше единицы (табл. 1), а потому состав макинавита варьирует: $Me_{1,01}S$, $Me_{1,03}S$, $Me_{1,14}S$.

Следует отметить, что химический состав пирротина, ассоциирующегося с



Рис. 2. Формы выделения макинавита из трубки Удачная-Западная

- а — макинавит (серое) в пирротине (светлое), замещенном магнетитом (темно-серое). Полированный шлиф УС-59-190, увел. 165;
- б — агрегат макинавита (светло-серое) в массе кимберлита (темное). Игольчатые и волокнистые образования по границе макинавита — хлорит (серое). Полированный шлиф 207-190, увел. 90;
- в — макинавит (серое, таблички в центре и зернистый агрегат) среди пирита и марказита (светлое). Полированный шлиф УС-210-274, увел. 165

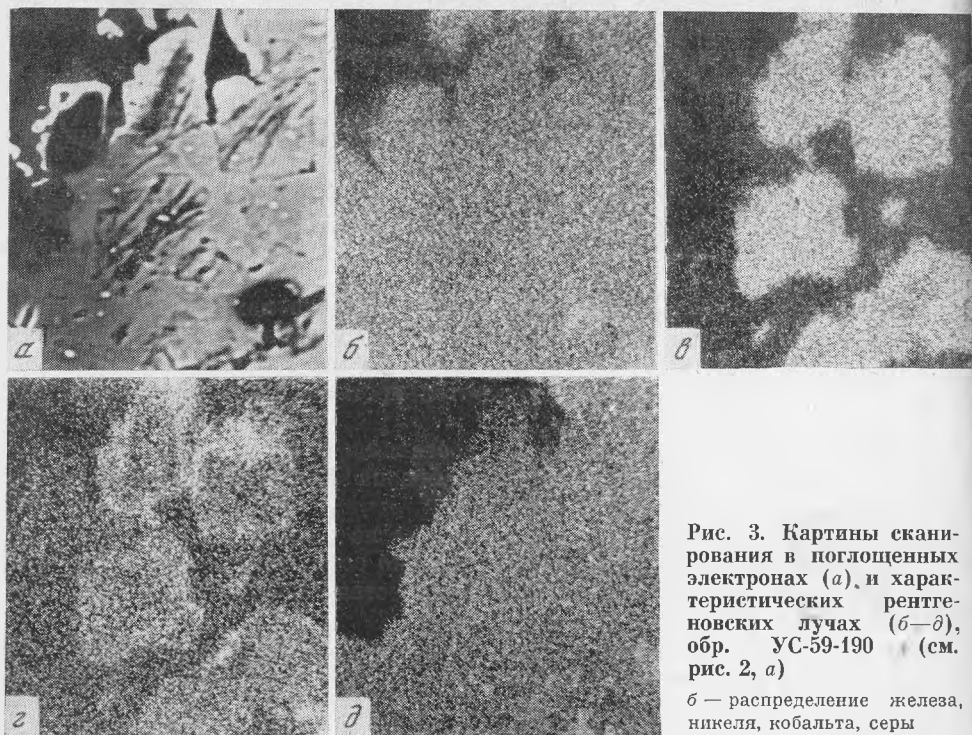


Рис. 3. Картины сканирования в поглощенных электронах (а), и характеристических рентгеновских лучах (б—д), обр. УС-59-190 (см. рис. 2, а)

б — распределение железа, никеля, кобальта, серы

макинавитом, также не отвечает стехиометрической формуле $Me_{0,99}S$, $Me_{0,94}S$, $Me_{0,92}S$ (табл. 1).

Таким образом, многие исследователи, предлагающие формулу макинавита $Me_{1+x}S$ и считающие, что макинавит не является полиморфной модификацией трюилита, совершенно правы (Clark and Clark, 1968; Babkine, Conguere, 1968; Takeno, Clark, 1967; Springer, 1968; Sarkar, 1971; и др.).

Анализы макинавита, приведенные в обобщающей работе (Schot et al., 1972), показывают широкие вариации содержания в нем никеля, кобальта, меди. В отдельных случаях указывается и на высокое, до 7—9 вес. %, содержание Cr (Clark, 1969). Большинство анализов рассчитывается на формулу $Me_{1+x}S$, т. е., несмотря на различные количества типичных для макинавита примесей, способных замещать до 15 ат. % Fe (Springer, 1968), сумма атомных количеств металлов всегда выше атомного количества серы. Наблюдающиеся в отдельных случаях некоторые исключения — атомные отношения Me/S — 0,994 (Springer, 1968), 0,92 — 0,93 (Sarkar, 1971) — можно объяснить погрешностями анализов из-за очень малых размеров зерен макинавита или срастаниями его с близким по составу минералом, но обогащенным серой и несколько различающимся по оптическим свойствам (Sarkar, 1971).

По составу изученный минерал ближе всего к макинавиту из Палабorry (Южная Африка) и месторождения Хитура (Финляндия), также содержащим 6—7 вес. % Ni и 0,1—0,6 вес. % Co, правда, в этих образцах установлено небольшое содержание меди — 0,04—0,4 вес. % (Springer, 1968; Schot et al., 1972).

К сожалению, не со всех анализированных зерен макинавита удалось сделать дебаеграммы. Наиболее удачная дебаеграмма (табл. 2), полученная с относительно крупного выделения (см. рис. 2, б), показала хорошее сходство с дебаеграммой макинавита, синтезированного Бернером (Berner, 1964) из водных растворов при низких температурах и атмос-

Таблица 1

Химический состав макинавита и пирротина из трубки Удачная, определенный на микрозонде MS-46 (20 кВ, 15 На)

Анализ	Fe		Ni		Co		S		Сум- ма	Fe+ +Ni+ +Co	(Fe+ +Ni+ +Co)/ /S	Рассчитанная формула
	1 *	2 **	1	2	1	2	1	2				

Макинавит

1	58,75	1,0520	5,94	0,1012	0,13	0,0022	32,54	1,0148	97,36	1,1554	1,1385	(Fe, Ni, Co) _{1,14} S
2	56,27	1,0076	6,94	0,1182	0,29	0,0049	35,99	1,1224	99,49	1,1307	1,0074	(Fe, Ni, Co) _{1,01} S
3	57,30	1,0260	5,95	0,1013	0,13	0,0022	35,21	1,0981	98,59	1,1295	1,0286	(Fe, Ni, Co) _{1,03} S

Пирротин

1	61,61	1,1032	0,09	0,0015	0,01	0,0002	35,77	1,1156	97,48	1,1049	0,9904	(Fe, Ni, Co) _{0,96} S
2	61,91	1,1086	0,35	0,0060	0,13	0,0022	37,91	1,1823	100,30	1,1168	0,9446	(Fe, Ni, Co) _{0,94} S
3	59,72	1,0694	0,09	0,0015	0,01	0,0002	37,34	1,1645	97,16	1,0711	0,9198	(Fe, Ni, Co) _{0,92} S

* Весовые концентрации с учетом поправок на разницу состава образца и эталона, рассчитанных на ЭВМ БЭСМ-6 (Тронева и др., 1975).

** Атомные количества. As и Cu — не обнаружены.

ферном давлении. Имеющиеся в литературе рентгенограммы также близки или почти идентичны.

Об образовании макинавита. Условия нахождения макинавита в кимберлитах Якутии показывают, что он относится к минералам, образовавшимся в конце гидротермального процесса, с которым связана кристаллизация таких минералов, как магнетит, пирит, марказит, редко галенит, из нерудных — серпофит и другие.

О более поздней кристаллизации макинавита по сравнению с глубинными сульфидами свидетельствуют соотношения его с пирротином, пентландитом, джерфишеритом, халькопиритом, которые, как правило, замещаются макинавитом. Однако наряду с этим он образует и самостоятельные выделения в массе кимберлита кристаллизуясь непосредственно из растворов. Характерно, что формы выделения макинавита в том и другом случае резко различаются.

Как уже отмечалось, в глубинных сульфидных включениях макинавит обростаёт и замещает по трещинкам пирротин. В более поздней ассоциации он также наблюдается среди пирротина, характеризуется кристаллическими формами выделения и образуется, по-видимому, в результате существенного замещения пирротина магнетитом (см. рис. 2 а). Нахождение прожилка макинавита, секущего магнетит, указывает на то, что сульфид железа образовался позже окисла. Не совсем обычен и понятен процесс появления макинавита в пирит-марказитовом агрегате. В природе нередки случаи дисульфидизации пирротина и как результат этого процесса — замещение его пирит-марказитовым агрегатом. Однако в основном из образцов наряду с дисульфидом железа были обнаружены таблички и их сростки макинавита (см. рис. 2, в).

Учитывая полученные экспериментальные данные и данные по изучению природных образований в термальном источнике Мохакка (Новая Зеландия) (Browne, Wood, 1974), свидетельствующие о первоначальном отложении моносulfида (макинавита) и последующем превращении его в пирит, можно предположить, что пирротин, сначала замещенный макинавитом, позднее был превращен в пирит-марказитовый агрегат, который, возможно, заместил и макинавит. Последний мог локально сохраниться в виде реликтов среди дисульфидов железа.

Макинавит был найден в галенит-пирротиновой ассоциации, в которой он наблюдается предпочтительно в пирротине, но встречается также по границам зерен этих двух минералов и нередко в массе галенита.