

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
минералогии***

Руководитель – профессор Спиридонов Э.М.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ
(ЧАСТЬ 2)

Москва
2023

Содержание:

Часть 1

1. Парамагнитные центры в кварце разноформационных месторождений
И.А. Бакшеев, С.В. Вяткин, Д.Г. Кошуг 3
2. Турмалин из кварц-турмалиновых метасоматитов и жил золоторудных проявлений Тувы
И.А. Бакшеев, Р.В. Кужугет (ТувИКОПР СО РАН), студ. Д.А. Чистякова 6
3. Минералогия вулканогенных золото-серебряных проявлений Телевеевского рудного поля, Чукотка
Е.А. Власов, студ. Д.С. Малышева 9
4. Литиевые пегматиты Сангиленского нагорья, Тува
Ю.Д. Гриценко, студ. А.О. Карпов, студ. С.Д. Суконкин 14
5. Рудосопровождающие метасоматиты березитовой формации плутоногенного гипабиссального золото-кварцевого месторождения Бестюбе. Каледонида Северного Казахстана
Г.Н. Назьмова, Ю.С. Шалаев, Э.М. Спиридонов, асп. Г.Н. Овсянников, Н.Н. Коротаяева 20
6. Гипотермальная минерализация вулканогенного колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб, Намибия, Юго-Западная Африка
Э.М. Спиридонов, М.Н. Мурашко (СПбГУ), Н.Н. Девнина (Горный музей, СПб), Н.Н. Коротаяева, И.М. Куликова (ИМГРЭ) 69

Часть 2

7. Тунгستنит, молибденит, калвертит и бетехтинит – продукты деструкции овамбоита и майкаинита вулканогенного колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб, Намибия, Юго-Западная Африка
Э.М. Спиридонов, М.Н. Мурашко (СПбГУ), Н.Н. Девнина (Горный музей, СПб), Н.Н. Коротаяева, И.М. Куликова (ИМГРЭ) 80
8. Миннесотаит $Fe^{2+}_3[(OH)_2/Si_4O_{10}]$ – продукт изменения фаялита и феррогортонолита в плагиогранитах горы Кафель. Мезозойды Горном Крыму
Э.М. Спиридонов, Е.В. Путинцева (СПбГУ) 88

9.	Сперрилит Главной Хараелахской сульфидной залежи. Октябрьское месторождение. Норильское рудное поле	
	Э.М. Спиридонов, С.Н. Беляков (ст. геолог Октябрьского рудника), Э.А. Кулагов (Норильский ГМК), асп. А.А. Машкина, студ. Ю.А. Иванова, студ. К.В. Егоров, студ. Д.И. Наумов, Н.Н. Коротаева	91
10.	Паоловит Главной Хараелахской сульфидной залежи. Октябрьское месторождение. Норильское рудное поле	
	Э.М. Спиридонов, С.Н. Беляков (ст. геолог Октябрьского рудника), Э.А. Кулагов (Норильский ГМК), асп. А.А. Машкина, студ. Ю.А. Иванова, студ. К.В. Егоров, студ. Д.И. Наумов, Н.Н. Коротаева	104
11.	Нигглиит Главной Хараелахской сульфидной залежи. Октябрьское месторождение. Норильское рудное поле	
	Э.М. Спиридонов, С.Н. Беляков (ст. геолог Октябрьского рудника), Э.А. Кулагов (Норильский ГМК), студ. К.В. Егоров, асп. А.А. Машкина, студ. Ю.А. Иванова, студ. И.Н. Куликов, студ. Д.И. Наумов, Н.Н. Коротаева	130

ТУНГСТЕНИТ, МОЛИБДЕНИТ, КАЛВЕРТИТ И БЕТЕХТИНИТ – ПРОДУКТЫ ДЕСТРУКЦИИ ОВАМБОИТА И МАЙКАИНИТА ВУЛКАНОГЕННОГО КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦУМЕБ. НАМИБИЯ, ЮГО-ЗАПАДНАЯ АФРИКА

Э.М. Спиридонов, М.Н. Мурашко (СПбГУ),
Н.Н. Девнина (Горный музей, СПб), Н.Н. Коротаева, И.М. Куликова (ИМГРЭ)

Богатейшее вулканогенное колчеданно-полиметаллическое Ag-Zn-Cu-Pb месторождение Цумеб – крупнейшее скопление минералов германия и галлия [4,14]. Это месторождение со своеобразным геологическим строением, сложной историей формирования и необычайным разнообразием минералов изучают целое столетие [32-34,31,27,24,1,36,35,22,37,14,2,4,18-20,15,28,30,23,21,25,11,5-8,13,17,29,38,12]. Тем не менее, его руды исследованы недостаточно. Ниже приведены некоторые результаты изучения образцов эндогенных руд глубоких горизонтов Цумеба, богатых минералами германия, из коллекций Горного музея С-Петербурга и сборов М.Н. Мурашко непосредственно на месторождении.

Месторождение Цумеб панафриканского возраста (граница венда – кембрия) расположено возле горной цепи Отави на северо-востоке Намибии (юго-западная Африка). Оно залегает в дислоцированных морских отложениях венда – доломитах, углеродистых доломитах, известняках, ледниковых – моренных отложениях тиллоидах, углеродистых аргиллитах, аркозовых и иного состава алевропесчаниках, разбитых множеством разломов [32-34,27,25,29,38]. Круто падающее лентообразное рудное тело с массой апофиз, которые секут слоистость и мелкие складки второго-третьего порядка во вмещающих доломитовых породах [32-34,27], сопряжено с дорудными вулканическими образованиями [36]. Из них более древнее трубообразное тело взрывных брекчий трахириодацитов, более молодые – рукавообразные и дайкообразные тела трахириодацитов. Вулканы интенсивно гидротермально изменены, превращены в полевошпатовые (калишпатовые) кварциты [34], «псевдоаплиты» [4 и др.], кварц-серицитовые (мусковитовые) метасоматиты с апатитом. Прилегающие доломиты дополнительно дислоцированы, гидротермально изменены, окремнены и перекристаллизованы. Послерудные магматические образования – это дайки, силлы и трубообразные тела долеритов и керсантитов [36].

По Гансу Шнейдерхёну, который много лет проводил подземное картирование рудной залежи Цумеба и долгое время исследовал его руды, Цумеб – это магматогенное гидротермальное месторождение замещения [14]. Руды Цумеба содержат массу реликтов замещённых доломитов, углеродистых доломитов, обрывки их складок, реликты гидротермально-изменённых кремнекислых вулканитов, реже иных пород.

Массивные сульфидные руды Цумеба на две трети состоят из галенита, сфалерита, халькозина, борнита, пирита, энаргита, халькопирита, теннантита. Жильные минералы в рудах – доломит, кварц, мусковит, апатит, кальцит, флогопит и иные. Особенностью руд Цумеба является грандиозное количество минералов Ge. Размер скоплений германита достигал многих метров в поперечнике, вес – сотен тонн [34]. Иные минералы Ge - реньерит, бриартит, германоколусит, бруногейерит, германийсодержащие сульванит, станноидит, моусонит, станнин [27,35,4,18,19,30,23,11,5-8,17,36,12].

По нашим данным [9,12], руды Цумеба включают гипотермальную, мезотермальную и эпитеермальную минерализации. Гипотермальную минерализацию образуют топаз, фторапатит, калишпат, кварц, флогопит, высокий халькозин, пирит, сложные сульфиды Ge, по составу близкие к германиту, но богатые W или Mo, – овамбоит $Cu_{20}(Cu,Fe)_6W_2(Ge,As)_6S_{32}$ и майкаинит $Cu_{20}(Cu,Fe)_6Mo_2(Ge,As)_6S_{32}$ [8], а так же высокотемпературный твёрдый раствор галлит – сфалерит - халькопирит, сложные сульфиды олова: станноидит и иные. Распространены существенно медистый овамбоит - $Cu_{20}(Cu_{4.8-5.2}Fe_{1.2-0.8})_6W_{1.9-2.1}(Ge_{4.0-4.8}As_{2-1.2})_6S_{32}$ и W – содержащий майкаинит - $Cu_{20}(Cu_{4-4.7}Fe_{1.9-1}Zn_{0.1-0.3})_6(Mo_{1.2-1.7}W_{0.8-0.3})_2(Ge_{3.8-4.1}As_{2.1-1.8}Ga_{0.1})_6S_{32}$.

Для мезотермальной минерализации характерно обилие халькопирита, который последовательно замещают борнит, высокий халькозин, теннантит [21]; пирит; продукты распада твёрдых растворов халькопирит – борнит, галлит – сфалерит; галенит, обогащённый Ga сфалерит, обогащённый Zn галлит, моусонит, формусковит, кварц, доломит, станнит, ферберит и иные. Высокий хальзин в ассоциации с зональным богатым W германитом замещают ранний овамбоит; нередко это обломки кристаллов овамбоита, т.е. мезотермальная минерализация замещала тектонизированные агрегаты гипотермальной минерализации. Типичный состав W-содержащего германита - $Cu_{20}(Fe_{3.5}Cu_{1.9}Zn_{0.7})_{6.1}(Fe_{1.6}W_{0.4})_2(Ge_{4.9}As_{0.9}Ga_{0.1})_{5.9}S_{32}$. Богатый W германит и высокий халькозин в заметной степени замещены реньеритом, теннантитом, сидеритом.

Эпитеермальная минерализация Цумеба развита среди и вокруг брекчированных ранних минеральных агрегатов, возникла при участии растворов с солёностью 6-12 масс. % экв. NaCl при 240 - <80⁰ С [25]. В её составе обильны галенит, маложелезистый сфалерит, обогащённый Cd, теннантит, пирит, низкий халькозин, доломит, марказит. Широко развиты не зональный, бедный W германит, галлит, реньерит. Там, где рудные агрегаты заместили деформированные углеродистые доломиты и углеродистые аргиллиты, обогащённые ванадием, в пирит-сфалерит-теннантит-галенитовых рудах не мало мелких кристаллов колусита и германоколусита в ассоциации с анатазом [11]. Для эпитеермальной минерализации Цумеба характерно чередование парагенезов, возникших при высокой f S₂ (они преобладают): это

низкий халькозин – пирит (марказит) – борнит – дигенит – германит – германоколусит – колусит; возникших при низкой $f S_2$ (редкие): пирротин – кубанит – магнетит – умангит Cu_3Se_2 – клаусталит $PbSe$ - реальгар; возникших при высокой $f O_2$ (редкие): гематит – маггемит – барит. Помимо указанных, в составе эпитермальной минерализации Цумеба - халькопирит, вюртцит, кварц, анкерит, кальцит, калишпат, мусковит, фаматинит, кубанит, сульванит, идаит, киноварь, гринокит, хоулит, штрмейерит. В её состав входят и продукты деструкции ранних высокотемпературных сульфидов германия, богатых W и Mo.

Продукты деструкции овамбоита $Cu_{20}(Cu,Fe)_6W_2(Ge,As)_6S_{32}$ представлены обильными тунгстенитом WS_2 (микропрожилки) (рис. 1) и низким халькозином (неправильной формы небольшие выделения), а также бетехтинитом $Cu_{21}FePb_2S_{15}$ и калвертитом Cu_8WS_6 (рис. 2). Тунгстенит – структурный аналог молибденита, даже политипы у них одинаковы [16].



Рисунок 1. Прожилки тунгстенита (белый) в брекчированном агрегате сложно зональных кристаллов овамбоита. В отражённых электронах.

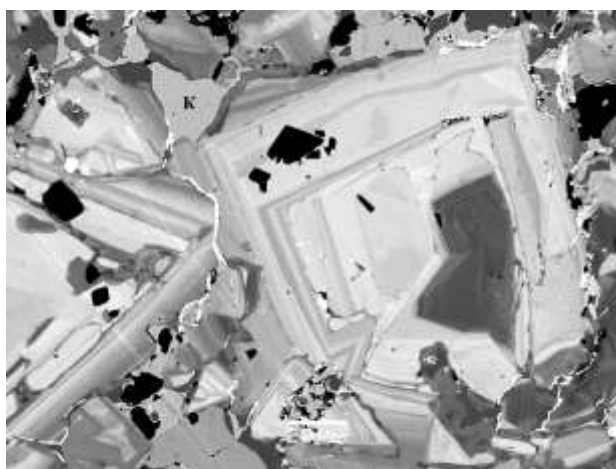


Рисунок 2. На продолжении прожилков тунгстенита (белый) небольшие гнёзда калвертита (К) в брекчированном агрегате сложно зональных кристаллов овамбоита. В отражённых электронах.

Типичный состав тунгстенита прожилков, масс. %: W 73.61; Mo 0.15; V 0.04; S 25.70; As 0.06; сумма 99.56 %; формула тунгстенита $(W_{0.996}Mo_{0.004}V_{0.002})_{1.002}(S_{1.996}As_{0.002})_{1.998}$. Состав низкого халькозина (в ассоциации с тунгстенитом), масс. %: Cu 78.87; Fe 0.17; Ag 0.20; Ga 0.09; S 19.86; Se 0.10; As 0.09; сумма 99.38 %; формула халькозина $(Cu_{1.992}Fe_{0.005}Ag_{0.003}Ga_{0.002})_{2.002}(S_{0.994}Se_{0.002}As_{0.002})_{0.998}$. Состав бетехтинита, масс. %: Cu 57.66; Fe 2.44; Pb 18.21; S 21.53; сумма 99.84 %; формула бетехтинита - $Cu_{20.16}Fe_{0.97}Pb_{1.95}S_{14.92}$. Состав калвертита, масс. %: Cu 57.26; Fe 0.25; Zn 0.14; W 20.13; Mo 0.43; S 21.57; сумма 99.78 %, формула калвертита $(Cu_{7.97}Fe_{0.04}Zn_{0.02})_{8.03}(W_{0.97}Mo_{0.04})_{1.01}S_{5.96}$. Вероятная реакция разложения овамбоита (состав минералов близок к реальному):

$$Cu_{24}Fe_2W_2Ge_4As_2S_{32} \text{ (овамбоит)} + 2 Cu_2S + 2 Pb \text{ p-p} \rightarrow WS_2 \text{ (тунгстенит)} + Cu_8WS_6 \text{ (калвертит)} + Cu_{20}FePb_2S_{15} \text{ (бетехтинит)} + FeS_2 \text{ (пирит)} + 4 Ge \text{ p-p} + As_2S_3 \text{ p-p} + 6 S \text{ p-p}.$$

Продукты деструкции богатого вольфрамом германита. В отдельных участках рудного тела месторождения Цумеб агрегаты кристаллов зонального обогащённого вольфрамом германита брекчированы и содержат множество прожилков и мелких гнёзд сидерита с оторочками тунгстенита – продукта замещения вольфрамоистого германита (рис. 3). Тунгстенит слагает и мономинеральные просечки и небольшие до 15 мкм гнёзда среди вольфрамоистого германита. Типичный состав тунгстенита, масс. %: W 73.24; Mo 0.23; S 25.78; сумма 99.25 %; формула тунгстенита $(W_{0.992}Mo_{0.006})_{0.998}S_{2.002}$. Состав сидерита, масс. %: FeO 51.50; MgO 3.92; MnO 4.89; CaO 2.81; формула сидерита $(Fe_{0.81}Mg_{0.11}Mn_{0.04}Ca_{0.04})CO_3$.

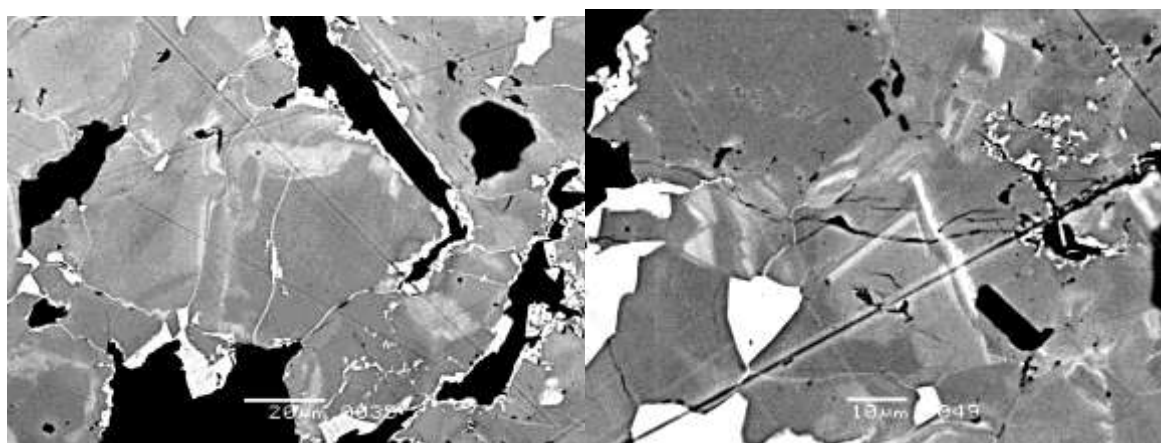


Рисунок 3. В брекчированном агрегате сложно зональных кристаллов вольфрамоистого германита серия гнёзд сидерита (чёрный) с оторочками и без оторочек тунгстенита (белый), в также обособленные прожилки и гнёзда тунгстенита. В отражённых электронах.

Продукты деструкции майкаинита $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe})_6\text{Mo}_2(\text{Ge,As})_6\text{S}_{32}$ – при частичном замещении - это мельчайшие пластины молибденита (рис. 4), при полном замещении - скопления мельчайших пластинок молибденита и бетехтинита в матрице низкого халькозина (рис. 5). Судя по треугольной морфологии отдельных пластинок молибденита, возможно, это политип молибденита-3R. Состав минерала близок к теоретическому, масс. %: Mo 59.16; W 0.34; S 39.27; Se 0.69; сумма 99.46 %; формула молибденита – $(\text{Mo}_{0.999}\text{W}_{0.003})_{1.002}(\text{S}_{1.984}\text{Se}_{0.014})_{1.998}$, Re – не обнаружен.

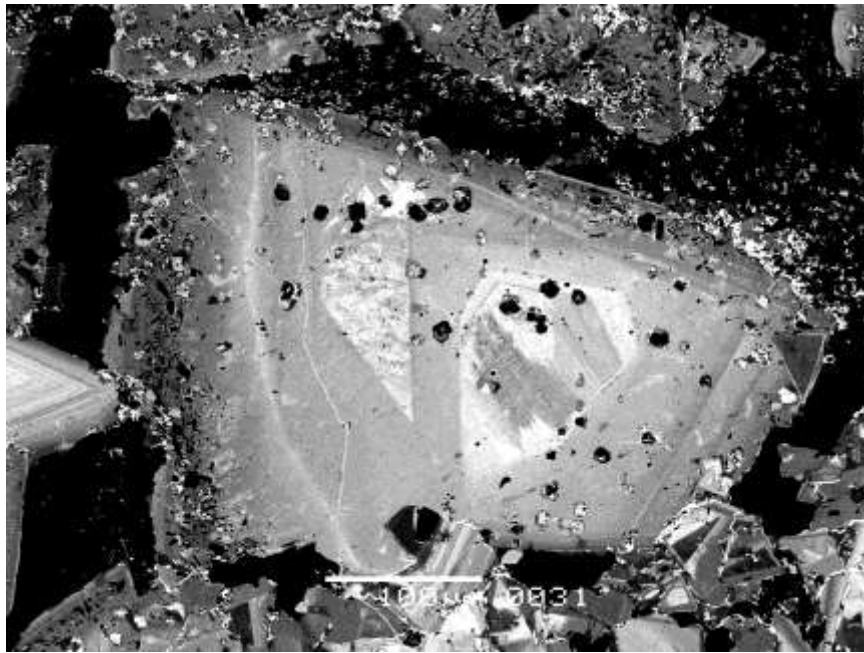


Рисунок 4. Майкаинит, окружающий кристалл сложно зонального овамбоита, частично замещён мельчайшими пластинками молибденита. В отражённых электронах.

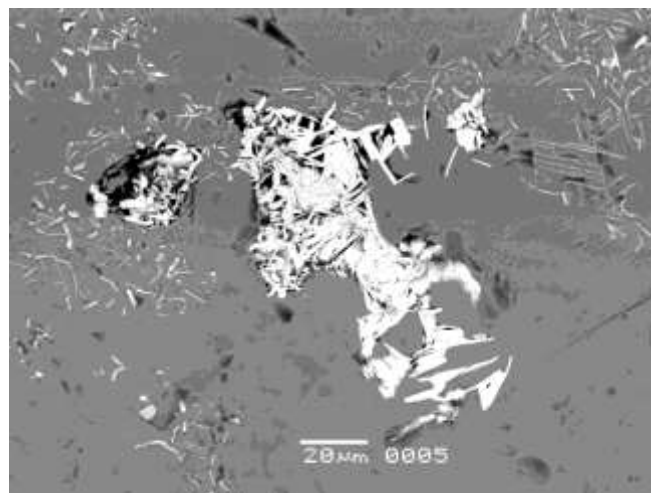
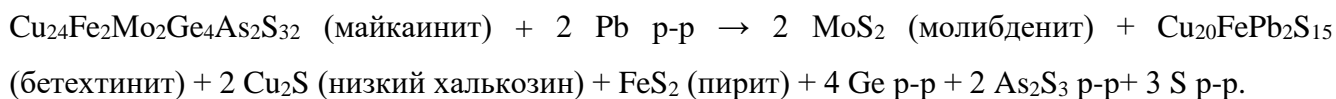


Рисунок 5. Псевдоморфоза по кристаллу майкаинита – скопление пластинок молибденита иголок бетехтинита в матрице низкого халькозита. В отражённых электронах.

Вероятная реакция разложения майкаинита:



Заключение. Характерные минералы эпитермальной минерализации вулканогенного колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб – дисульфиды вольфрама и молибдена. Тунгстенит содержит <0.3 масс. % Мо, молибденит – 0.3 масс. % W, что свидетельствует о низкой температуре их образования, судя по экспериментальным данным [26]. С ними ассоциируют характерные для низкотемпературных гидротермальных месторождений – низкий халькозин и бетехтинит.

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

1. Болдырев А.К., Бетехтин А.Г., Годлевский М.Н., Григорьев Д.П., Киселёв А.И., Левицкий О.Д., Разумовский Н.К., Смирнов А.А., Соболев В.С., Успенский Н.М., Черных В.В., Шафрановский И.И. Курс минералогии. М.-Л.: ОНТИ. **1936**. 1056 с.
2. Волинский И.С., Логинова Л.А. Сравнительная количественная характеристика оптических постоянных некоторых «розовых» сульфидов // Тр. ИМГРЭ. 1961. Вып. 6. С. 72-85.
3. Вулканогенные колчеданно-полиметаллические месторождения (на примере Рудного Алтая) (ред. Г.Ф. Яковлев). М.: изд. МГУ. **1978**. 231 с.
4. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: ИЛ. **1962**. 1132 с.
5. Спиридонов Э.М. Особенности состава блёклых руд в ассоциации с сульфосолями германия // Докл. АН СССР. **1987**. Т. 294. № 5. С. 1197-1199.
6. Спиридонов Э.М. О составе германита // Докл. АН СССР. **1987**. Т. 295. С. 477-481.
7. Спиридонов Э.М. Новые сульфидные минеральные фазы Ge-Mo-W колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб (Намибия) // Геология рудных месторождений. **1994**. Т. 36. № 4. С. 370-376.
8. Спиридонов Э.М. Майкаинит $\text{Cu}_{20}(\text{Fe,Cu})_6\text{Mo}_2\text{Ge}_6\text{S}_{32}$ и овамбоит $\text{Cu}_{20}(\text{Fe,Cu,Zn})_6\text{W}_2\text{Ge}_6\text{S}_{32}$ - новые минералы колчеданно-полиметаллических руд // Докл. РАН. **2003**. Т. 393. № 6. С. 1-4.

9. Спиридонов Э.М. Вулканогенные эпипермальные, мезотермальные, гипотермальные (ксенотермальные) месторождения золота и их минерально-геохимические особенности. В кн.: Вулканизм и геодинамика. Т. 2. Петропавловск-Камчатский. **2009**. С. 814-817.
10. Спиридонов Э.М., Качаловская В.М., Бадалов А.С. Разновидности колусита. О ванадиевом и ванадиево-мышьяковистом “германите” // Вестн. МГУ. Сер. геол. **1986**. № 3. С. 60-69.
11. Спиридонов Э.М., Качаловская В.М., Ковачев В.В. Германоколусит $Cu_{26}V_2(Ge, As)_6S_{32}$ - новый минерал // Вестн. МГУ. Геология. **1992**. № 6. С. 50-54.
12. Спиридонов Э.М., Мурашко М.Н. Генетическая минералогия Ge, Ga, W, Mo, V, Sn эндогенных руд колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб, Намибия. В кн.: Современная минералогия: от теории к практике. СПб.: **2010**. С. 277-279.
13. Чвилёва Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С, Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Свешникова О.Л. Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете. М.: Недра. **1988**. 505 с.
14. Шнейдерхён Г. Месторождения полезных ископаемых. М.: ИЛ. **1958**. 501 с.
15. Bartelke W. Die erzlagstätte von Tsumeb / Südwestafrika und ihre mineralien // Der Aufschluss. **1976**. Bd. 27. S. 393-439.
16. Gait R.I., Mandarino J.A. Polytypes of tungstenite // Canad. Mineral. **1970**. Vol. 10. P. 729-731.
17. Gebhard G. Tsumeb, a unique mineral locality. Grossenseifen: GG Publishing. **1999**. 328 s.
18. Geier B.H., Ottemann I. New primary vanadium-, germanium-, gallium-, and tin-minerals from the Pb-Zn-Cu deposit Tsumeb, South West Africa // Mineral. Deposita. **1970**. Vol. 5. P. 29-40.
19. Geier B.H., Ottemann I. Briartit, das dritte Germaniumsulfid-Mineral aus der Erzlagstätte Tsumeb // Neues. Jahrb. Mineral. Abh. **1972**. Bd. 118. S. 97-109.
20. Geier B.H., Ottemann I. Über Betehtinit von Tsumeb // Neues Jahrbuch Mineralien Monatsch. **1973**. Bd. 9. S. 416-426.
21. Haynes A. A geochemical model for sulphide paragenesis and zoning in the Cu-Fe-As-S system Tsumeb, South West Africa, Namibia // Chem. Geol. **1984/1985**. Bd. 47. S. 183-190.
22. Hurlbut C.S. The wurtzite – greenockite series // Amer. Mineral. **1957**. Vol. 42. P. 184-190.
23. Keller P. Tsumeb // Lapis. **1984**. Bd. 9. N 7/8. S. 13-23, 52-63.
24. Lindgren W. Mineral deposits. 4th ed. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, Inc. **1933**. 930 p.
25. Lombaard A.E., Güttchel A., Innes J., Krüger T.L. The Tsumeb lead-copper-zinc-silver deposit, South West Afrika, Namibia. In: Mineral Deposits of Southern Africa. **1986**. P. 1761-1787.

26. *Moh G.H., Udubasa G.* Molybdenite – tungstenite solid solution series and phase relations in the Mo – W – S system // *Chem. Geol.* **1976.** Bd. 35. S. 327-335.
27. *Moritz H.* Die sulfidische erze der Tsumeb-mine vom ausgehenden bis zur XVI Sohle (-460 m) // *Neues Jahrbuch Mineralien Abh.* **1933.** Bd. 67. S. 118-153.
28. *Ottemann I., Nuber B., Geier B.H.* A germanium and zinc bearing variety of mawsonite from the Tsumeb deposit // *Chem. Erde.* **1977.** Bd. 36. S. 110-137.
29. *Passchier C.W., Trouw R., Ribeiro A., Paciullo F.* Tectonic evolution of the southern Kaoko belt, Namibia // *J. African Earth Sci.* **2002.** Vol. 35. P. 61-75.
30. *Pinch W.W., Wilson W.E.* TSUMEB! The world's greatest mineral locality // *Mineral. Record.* **1977.** Vol. 8. N 3. 128 p.
31. *Pufahl O.* «Germanite», ein germanium mineral und erz von Tsumeb, Süd-West Afrika // *Metall und Erz.* **1922.** Bd. 19. S. 324-325.
32. *Schneiderhöhn H.* Die erzlagerstätten das Otaviberslandes, Deutsch-Südwest-Afrika // *Metall und Erz.* **1920.** Bd. 17. S. 203-302.
33. *Schneiderhöhn H.* Das Otavibersland und seine Erzlagerstätten // *Zeitschrift für praktische Geology.* **1929.** Bd. 37. S. 87-116.
34. *Schneiderhöhn H.* Zur erforschungsgeschichte der erze der Tsumeb-Mine und der geologischen verhältnisse des Otaviberslands, SW-Afrika // *Neues Jahrb. Mineral. Mitt.* **1958.** Bd. 6. S. 125-136.
35. *Sclar C.B., Geier B.H.* The paragenetic relationships of germanite and renierite from Tsumeb, South West Africa // *Econ. Geol.* **1957.** Vol. 52. P. 612-631.
36. *Söhnge P.G.* The Tsumeb story, pipe-like, massive-sulphide ore body appears to fill volcanic pipe in depth // *Mining World.* **1952.** Vol. 14. № 6. P. 22-24.
37. *Strunz H., Geier B.H., Seeliger E.* Gallit, CuGaS₂, das erste selbständige gallium - mineral und seine verbreitung in den erzen der Tsumeb und Kipushi mine // *Neues Jahrb. Mineral. Monat.* **1958.** S. 241-264.
38. *von Bezing L., Bode R., Jahn S.* Namibia. Minerals and localities. Bode Verlag GmbH: Haltern, Germany. **2007.** 856 p.

МИННЕСОТАИТ $\text{Fe}^{2+}_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ – ПРОДУКТ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЯЛИТА И ФЕРРОГОРТОНОЛИТА В ПЛАГИОГРАНИТАХ ГОРЫ КАСТЕЛЬ. МЕЗОЗОИДЫ ГОРНОГО КРЫМА

Э.М. Спиридонов, Е.В. Путинцева (СПбГУ)

Миннесотаит $\text{Fe}^{2+}_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ – железистый аналог талька, типичный минерал железных руд - метаморфизованных в условиях цеолитовой и начала пренит-пумпеллиитовой фации железистых осадков [1], а также – низкотемпературного изменения – гидратации железистого оливина – фаялита и феррогортонолита [5]. В нашей стране находки миннесотаита единичны. Ниже описана находка этого минерала в эндемичных фаялитовых и феррогортонолитовых плагиогранитах горы Кагель в Горном Крыму [2,3].

В ядерной части глубоко эродированного Южнобережного поднятия Горного Крыма развиты позднеюрские плагиогранитоиды Кагельского интрузивного комплекса [4]. Комплекс образуют высокожелезистые плагиограниты, богатые цирконом, монацитом и ксенотимом, и тесно с ними связанные кварцевые диориты интрузивов гор Кагель, Шахра, Ай-Йори, Серагоз. Интрузивы окружены ореолами экзоконтактовых биотитовых роговиков, изредка с силлиманитом. Судя по особенностям микроструктур, порфиридные и резко порфиридные плагиограниты г. Кагель формировались в крайне мало глубинной обстановке. Интрузивы сопровождают дайки плагиогранит—порфиров и ореолы послеинтрузивных среднетемпературных гидротермальных метасоматитов – пропицитов мало глубинной эпидот-хлоритовой фации и березитизированные породы с пиритом.

В резко порфиридных плагиогранитах непосредственного эндоконтакта интрузива горы Кагель развит феррогортонолит Fo 14.5 – 10.4 с 2.3 – 3.0 масс. % MnO в сростании с андезином - лабрадором (рис. 1-2). На удалении от контакта плагиограниты содержат железистый феррогортонолит Fo 10.6 и преобладающий фаялит Fo 9.6 – 7.7 с 2.7 – 3.0 масс. % MnO; с ними ассоциирует плагиоклаз от лабрадора и преобладающего андезина до олигоклаза. На ещё большем удалении от контакта в составе плагиогранитов преобладает фаялит Fo 9.3 – 5.9 с 2.9 – 3.2 масс. % MnO; с этим фаялитом ассоциирует андезин до калиевого олигоклаза. Фаялит и феррогортонолит нередко ассоциируют с высокожелезистыми ромбическим пироксеном – зулитом и биотитом – аннитом [2,3].

В отдельных образцах плагиогранитов вокруг феррогортонолита (рис. 1) и вокруг фаялита развиты узкие каёмки замещения миннесотаита, в шлифе зелёного цвета. В проходящем свете при скрещенных николях миннесотаит напоминает тальк (рис. 2).

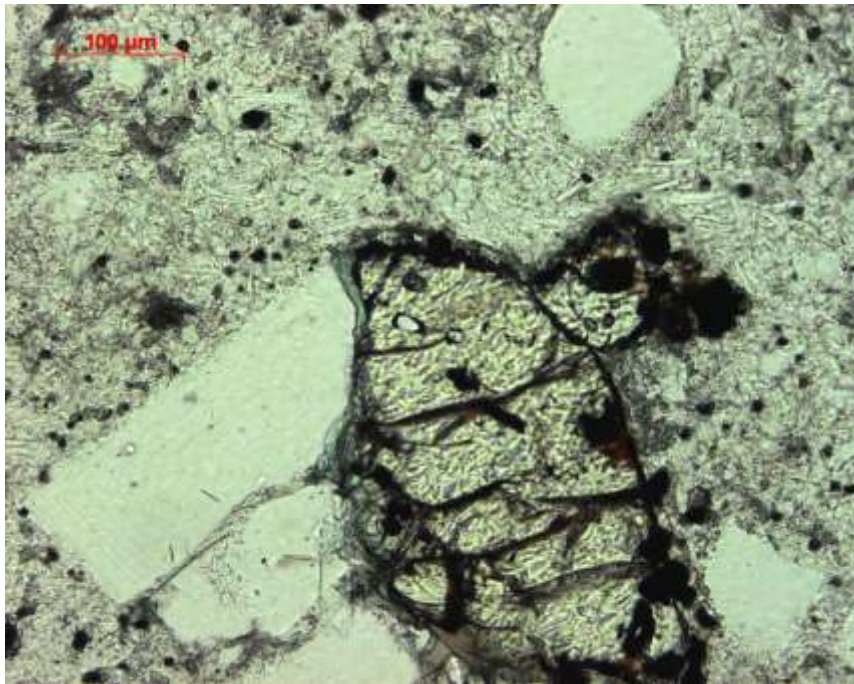


Рис. 1. Вкрапленник - срастание феррогортонолита (рельефный) с андезин-лабрадором и вкрапленник высокого кварца в мелкозернистой матрице. Вокруг кристалла феррогортонолита кайма замещения – низко рельефный миннесотаит зелёного цвета. В проходящем свете при 1 никеле. Плагииграниты востока южного склона горы Кабель. Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

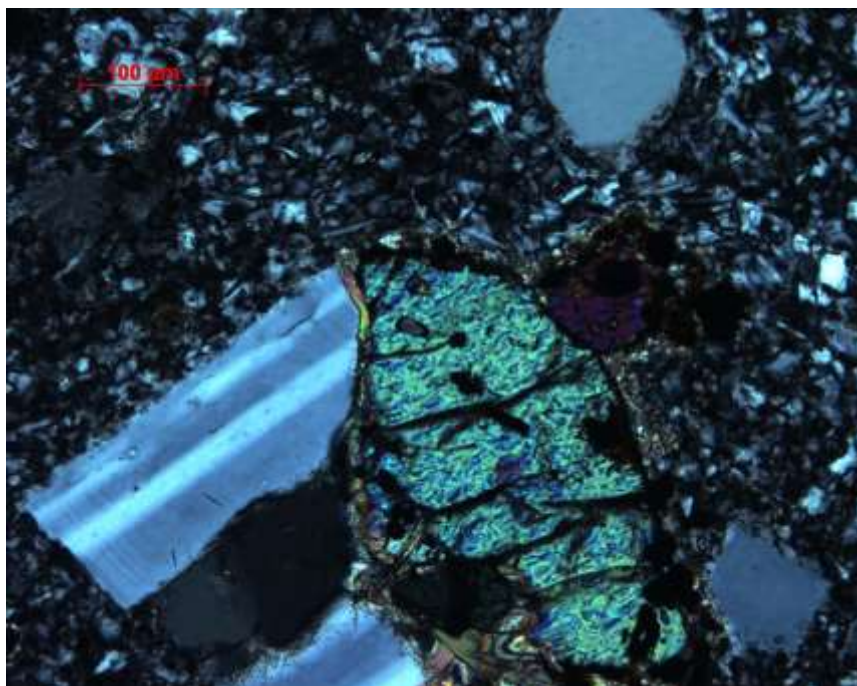


Рис. 1. Тот же шлиф. Вокруг кристалла феррогортонолита кайма замещения – миннесотаит, отчётливо анизотропный. В проходящем свете, николи х.

Химический состав миннесотаита из каймы замещения у феррогортонолита, масс. %:
 SiO_2 50.60; FeO 43.41; MnO 1.20; MgO 0.51; сумма 95.72%, что отвечает формуле

$(\text{Fe}^{2+}_{2.87}\text{Mn}^{2+}_{0.08}\text{Mg}_{0.06})_{3.01}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$. Как видно, миннесотаит наследует особенности состава феррогортонолита и фаялита, - заметно обогащён марганцем.

Очевидно, что миннесотаит в плагиогранитах горы Кастель – продукт послемагматической низкотемпературной гидратации феррогортонолита и фаялита, поскольку миннесотаит устойчив при температуре ниже 280° С [5].

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

1. *Миясиро А.* Метаморфизм и метаморфические пояса. М.: Мир. **1976.** 536 с.
2. *Спиридонов Э.М.* Фаялит и феррогортонолит в послеостроводужных плагиогранитах горы Кастель в киммеридах Горного Крыма // Зап. РМО. **2021.** Ч. 150. Вып. 2. С. 57-68.
3. *Спиридонов Э.М., Путинцева Е.В.* Интрузив послеостроводужных фаялитовых плагиогранитов горы Кастель в киммеридах Горного Крыма // Вестн. МГУ. Геология. **2021.** № 4. С. 98-108.
4. *Спиридонов Э.М., Фёдоров Т.О., Ряховский В.М.* Магматические образования Горного Крыма.
Статьи 1 и 2 // Бюлл. МОИП. Геол. **1990.** Т. 65. Вып. 4. С. 119-134. Вып. 6. С. 102-112.
5. *Philpotts A.R., Ague J.J.* Principles of igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press. **2009.** 667 p.

СПЕРРИЛИТ ГЛАВНОЙ ХАРАЕЛАХСКОЙ СУЛЬФИДНОЙ ЗАЛЕЖИ. ОКТЯБРЬСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. НОРИЛЬСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ

Э.М. Спиридонов, С.Н. Беляков (ст. геолог Октябрьского рудника),
Э.А. Кулагов (Норильский ГМК), асп. А.А. Машкина, студ. Ю.А. Иванова,
студ. К.В. Егоров, студ. Д.И. Наумов, Н.Н. Коротаева

Сперрилит. Кубический диарсенид платины – сперрилит $PtAs_2$ – один из распространённых минералов платины. Кристаллами сперрилита размером до 2.5 см славились пегматоидные гортонолитовые дуниты трубок Дрикоп, Онвервахт и Моихук в Бушвелдском интрузиве [38]. Магматогенные сульфидные руды Главной Хараелахской залежи Октябрьского месторождения Норильского рудного поля содержат монокристаллы (метакристаллы) сперрилита длиной до 4 - 7 см, кристаллы – двойники длиной до 11-21 см, сростания – скопления кристаллов (метакристаллов) сперрилита до нескольких десятков см в поперечнике [17]. В магматических малосульфидных (Бушвелд...) и сульфидных месторождениях (Норильск, Садбери...) развиты метакристаллы сперрилита, заместившие продукты распада высокотемпературных сульфидных твёрдых растворов – пирротин, троилит, пентландит, халькопирит, кубанит, талнахит, моихукит, путоранит, магматогенные куперит PtS и брэггит $(Pt,Pd,Ni)S$, интерметаллиды $Pt-Fe$ [1,7,8-17,22,25,26,29,30,34,38], магнетит; по нашим данным, генезис такого сперрилита – пневматолитовый [9-11,13]; состав этого сперрилита обычно близок к теоретическому; значительно реже минерал содержит заметную примесь Sb [8,9]. Изредка, в малосульфидных рудах месторождений Уральского (Нижнетагильского) – Аляскинского (Гудньосбей) типа, развит полный ряд твёрдых растворов сперрилит $PtAs_2$ - геверсит $PtSb_2$ [25]. Сперрилит – характерный акцессорный минерал гидротермальных плутоногенных $Au-Mo-Cu$ -порфировых месторождений [37], эпитермальных $Pt-Pd-Au-Se$ и $U-Ag-Bi-Ni-Co$ месторождений [21 и др.]. Сперрилит довольно широко развит и в метаморфизованных рудах благородных металлов. В золотоносных конгломератах Витватерсранда, метаморфизованных в условиях пумпеллиит-актинолитовой фации до фации голубых сланцев, сперрилит слагает каймы замещения на окатанных зёрнах ферроплатины (источник As – прослой пиритоносных чёрных сланцев) [27]. В рудах, метаморфизованных в условиях от фации зелёных сланцев до амфиболитовой и гранулитовой, сперрилит обычно ассоциирует с арсенидами и сульфоарсенидами $Ni-Co-Fe$: кобальтином, маухеритом... [20,22-24,31,32]. В высокоградно метаморфизованных рудах развит и сернистый сперрилит, твёрдый раствор сперрилит - платарсит $PtAsS$ [20,22], кристаллические структуры которых сходны [36]. В высокоградно метаморфизованных

рудах развит и родисто-сернистый сперрилит, вплоть до состава $Pt_{0.8}Rh_{0.2}As_{1.5}S_{0.5}$ [20], это – твёрдый раствор сперрилита и холингвортита $RhAsS$. Более распространён парагенез сперрилла без Rh и холингвортита [31,32]. Такой парагенез развит и в рудах не метаморфизованных м-ний [1]. В норильских рудах, метаморфизованных в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций, новообразованного сперрилита нет [35].

Норильское рудное поле расположено в северо-западном углу дорифейской Восточно-Сибирской платформы, в области краевых дислокаций [2.3,18.19]. Рудное поле образуют южный Норильский и северный Талнахский рудные узлы. Плутоногенные Co-Ni-Cu сульфидные месторождения с крупнейшими ресурсами Pd, Pt, Au, Ag генетически связаны с интрузивами оливиновых габбро-долеритов норильского типа [1,2.3,18,19], производных трапповой формации P₂-T₁. Магматические сульфиды слагают вкрапленность в интрузивных породах, шпире, жилы и залежи. Поскольку температура кристаллизации сульфидных расплавов ниже, чем у силикатных, при остывании рудоносных интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата в их нижние части и под интрузивы [2,3]. Такова и Главная Хараелахская сульфидная залежь Октябрьского месторождения Талнахского рудного узла. Изотопный состав Pb как в породах рудоносных интрузивов, так и в магматических сульфидных рудах и у минералов Pd и Pt в Норильском и в Талнахском рудном узлах заметно отличается [14]; талнахские заметно более радиогенные. Это – свидетельство генетических связей минералов Pd и Pt с сульфидными рудами, а руд – с конкретными интрузивами.

Главная Хараелахская сульфидная залежь размером ~3000x1000x5-75 м, субширотного простирания, размещена в нижней части и, главным образом, под Хараелахским (Таймырским) интрузивом норильского типа. Это – крупнейшее месторождение Pd на Земле, богатое и Pt, Au, Ag. Низы залежи и её периферические части сложены скоплениями кристаллов Mss1, Mss2, заметно обогащённых серой; температура их кристаллизации ~1150 и ~1100° C; среди продуктов их субсолидусных превращений преобладает сернистый – моноклинный пирротин Fe_7S_8 [10,11]. Поэтому, остальная часть залежи – центр и её верхние части, помимо кристаллов Mss1, Mss2, сложены скоплениями кристаллов Iss1, Iss2, Iss3, Iss4, Iss5, недосыщенных серой; температура их кристаллизации от ~950 до ~760° C; среди продуктов их субсолидусных превращений наряду с халькопиритом, кубанитом, пентландитом, обильны минералы группы халькопирита, недосыщенные серой, – талнахит $Cu_{18}Fe_{16}S_{32}$, моихукит $Cu_{18}Fe_{18}S_{32}$, путоранит $Cu_{17}(Fe,Ni)_{18}S_{32}$ [1,10,11,15]. Размер кристаллов Iss3 в центре Главной Хараелахской залежи составляет до 35 см, кристаллов Iss4 и Iss5 в прикровельной части залежи – до 15 см, размер кристаллов пентландита (продукта

распада Iss4 - Iss5) – до 6 см. При кристаллизации высокоТ сульфидных твёрдых растворов благородные металлы были включены в эти твёрдые растворы; при этом, Rh, Ru, Os, Ir – Mss-совместимые, Pt, Pd, Au, Ag – Iss- совместимые [30]. Соответственно, существенно пирротиновые руды не должны были бы содержать заметное количество минералов платины и палладия, а их там местами много, в частности, сперрилита. Это свидетельствует о флюидном перераспределении благородных металлов при формировании их минералов.

Уникальная особенность норильских руд – наличие поздних легкоплавких (Т крист. ~ 550° С) эвтектик PbSss - Iss5 (или Iss4, Iss3) [9,17]. Сульфидные руды – эвтектические сростания слагают гнёзда и секущие жилы нескольких поколений мощностью от первых см до 120 см и длиной от первых см до многих метров в различных частях залежей массивных сульфидных руд, в интрузивных породах и роговиках, которые эти руды окружают. Значительное число таких гнёзд и жил развиты в прикровельной части Главной Хараелахской залежи. Причина их появления – обилие калия и когерентного свинца в норильских рудно-магматических системах [9]. Продукты субсолидусных превращений PbSss – матрица галенита и тельца распада алтаита; судя по составу продуктов распада, температура распада отвечала 425-415° С [6]. Сульфидные руды – эвтектические сростания PbSss - Iss экстремально богаты Pd, Pt, Ag, Au и их минералами [9-17]. Во многих рудных столбах Главной Хараелахской залежи преобладающая часть минералов платиновых металлов и золота-серебра находится в гнёздах и жилах эвтектических руд, либо у контакта таких жил.

Норильские сульфидные расплавы были богаты флюидами (H₂O, K, Cl, F, CO, COS, CH₄, P, Ba, Ti...). Каждое тело магматических сульфидов окружено ореолом флюидного воздействия из агрегатов титанистого биотита-флогопита, хлорапатита, фторапатита, амфиболов, ангидрита, магнетита или титаномагнетита, джерфишерита [1-3,7,9-11,13,17,33,34]. Масштаб ореола коррелирован с размером тел сульфидов, около крупных залежей ширина ореола превышает 10-15 м. Ареал распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных тел и совпадает с ореолами флюидного воздействия около сульфидных тел. Так, в 6 м выше кровли Главной Хараелахской залежи среди роговиков в гнезде биотита и амфибола без сульфидов нашли 8 мм кристалл сперрилита [10].

Для норильских руд типичны соотношения – Pd:Pt = 3÷4, Ag:Au = 30÷40. Преобладающая часть Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами, часто микронного размера. Часть Pd и Ag рассеяна в пентландите.

Несмотря на то, что изучение минералов благородных металлов в норильских рудах многие десятилетия проводили О.Е. Звягинцев, Е.В. Искюль, И.Н. Масленицкий, Э.А.

Кулагов, А.Д. Генкин, И.В. Муравьёва, В.Д. Бегизов, Т.Л. Евстигнеева, С.Ф. Служеникин, Л.Н. Вяльсов, В.А. Коваленкер, А.Ю. Барков, А.И. Пономаренко, Н.С. Рудашевский, Э.М. Спиридонов и иные исследователи, мы только начинаем понимать реально сложную и длительную историю их формирования. Большинство геологов считают минералы благородных металлов норильских руд продуктами магматической кристаллизации. Уже в 1968 г. А.Д. Генкин предположил, что эти минералы могли образоваться и в послемагматических процессах при участии флюидов. В дальнейшем многие исследователи доказали, что часть минералов благородных металлов – метакристаллы [1,6,7 и др.]. Наши наблюдения показали, что вся масса минералов благородных металлов норильских руд образована путем замещения магматических сульфидных руд и прилегающих пород, эти минералы замещали структуры распада галенит - алтаит, при этом галенит очищался от телец алтаита, с метасомами этих минералов ассоциируют метасомы алтаита и метасомы хлорсодержащих сульфидов К-Тl: джерфишерита и талфенисита [9-17,34]. Эти факты – прямое доказательство флюидно-метасоматического, пневматолитового генезиса минералов Pd, Pt, Au, Ag в норильских сульфидных рудах. Пневматолитовые минералы Pd и Pt – интерметаллиды : станниды, висмутиды, куприды-станниды, плюмбиды и близкие теллуриды, арсениды, антимониды. С ними ассоциируют минералы Au-Cu и Au-Ag. В рудах присутствует когениит . Таким образом, пневматолитовые минералы благородных металлов возникли в резко восстановительных условиях, при крайне низкой активности сульфидной серы и кислорода. Вероятно, при участии карбониллов (и/или фуллеридов) платиновых металлов при T менее 415-410° C, это – T распада PbSss [6] и верхний предел устойчивости тетрааурикуприда, который ассоциирует со многими минералами палладия и платины норильских руд [16].

Э.М. Спиридонов [10,11] разделил историю образования пневматолитовых минералов благородных металлов норильских руд на 7 стадий. Сперрилит возник на последней стадии.

Сперрилит Главной Хараелахской сульфидной залежи – наиболее поздний из пневматолитовых минералов благородных металлов. Границы его кристаллов секут все типы первичных сульфидных минералов и магнетит руд, тетраферроплатину, паоловит, инсизваит, геверсит, нигглиит, рустенбургит, атокит, таймырит, соболевскит, меньшековит, котульскит, фрудит, кабриит, электрум, кюстелит, Au серебро (рис. 1-11). Размер метакристаллов варьирует



Рис. 1. Скопление метакристаллов сперрилита в талнахитовых рудах. 105 мм.
Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Верхи Главной Хараелахской залежи. Гор. – 430 м.
Колл. Е.В. Середы. Фото М.А. Богомолова.



Рис. 2. Скопление метакристаллов сперрилита в моихукитовых рудах. 50x36 мм.
Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Верхи Главной Хараелахской залежи. Гор. – 430 м.
Колл. и фото Э.М. Спиридонова.



Рис. 3. Метакристалл сперрилита на контакте жилы эвтектических руд (справа) и роговиков (слева). Верхний контакт Главной Хараелахской залежи. Гор. – 430 м.

Колл. и фото Э.М. Спиридонова.



Рис. 4. Плоский метакристалл сперрилита длиной 47 мм в моихукитовых рудах. Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. -330 м. Колл. Е.В. Середы. Фото М.А. Богомолова.



Рис. 5. Гнездо метакристаллов сперрилита в моихукитовых рудах. 65x33 мм. Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Верхи Главной Хараелахской залежи. Гор. – 530 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

от микронного до 4-7 см, двойников – до 11-21 см. Размер гнёзд (скоплений метакристаллов сперрилита) – от долей мм (рис. 8,10) до десятков см в поперечнике [10,11]. Форма кристаллов разнообразная: от простых кубов и кубооктаэдров до весьма сложной. Нередки уплощённые кристаллы (рис. 3). Обычный случай, когда одни грани метакристалла идеальной формы и гладкие, остальная морфология – «корявая» (рис. 4,5,7).

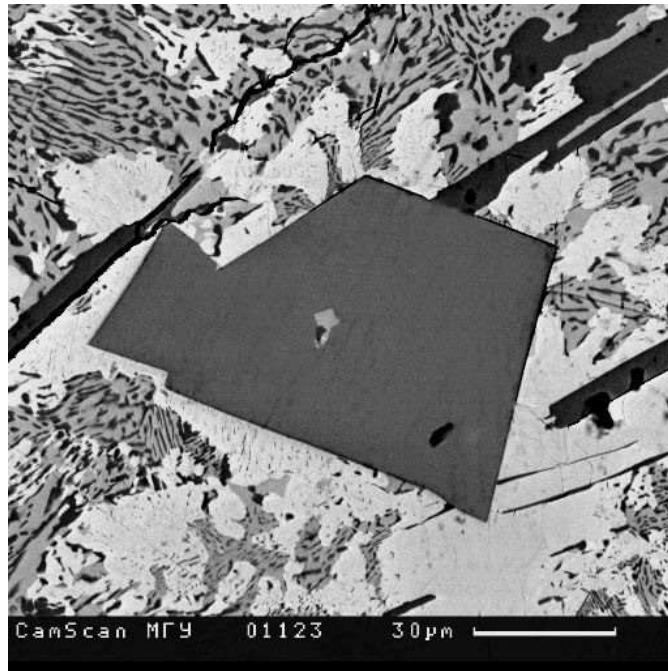


Рис. 6. Метакристалл сперрилита (в центре) с «объедками» геверсита (серый) и паоловита (чёрный) сечёт выделения инсизваита (светлый), сростаний геверсита (серый) и паоловита (чёрный), пластины паоловита. В отражённых электронах. Гнездо минералов благородных металлов в эвтектических рудах. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 530 м.

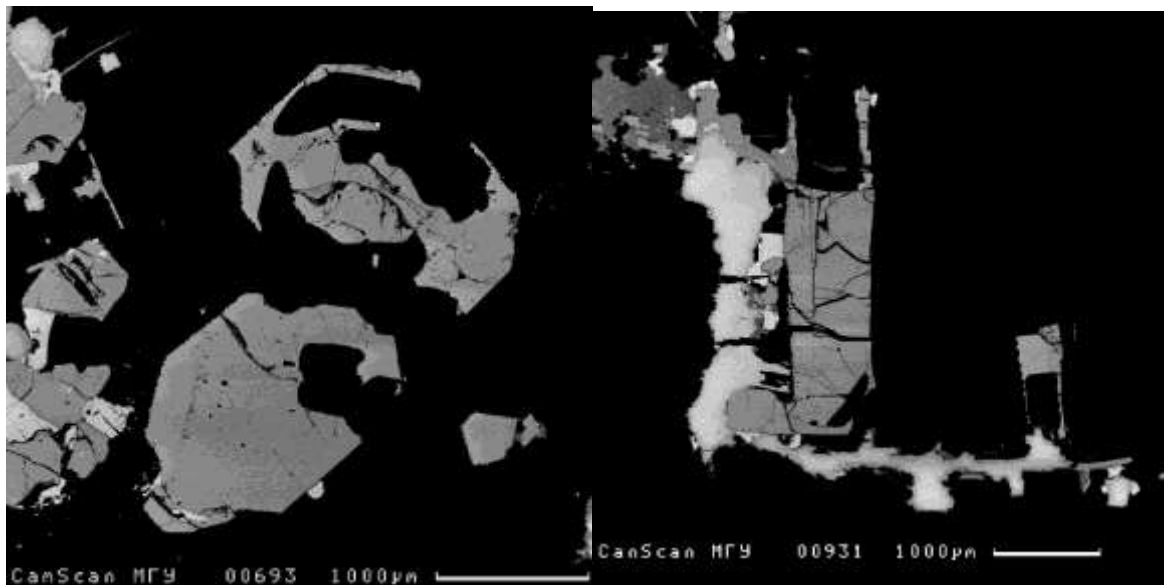


Рис. 7. Сложной формы метакристаллы сперрилита (серые) секут выделения рустенбургита - атокита (светлые) и матрицу моихукита. В отражённых электронах. Гнездо минералов благородных металлов в эвтектических рудах. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м.

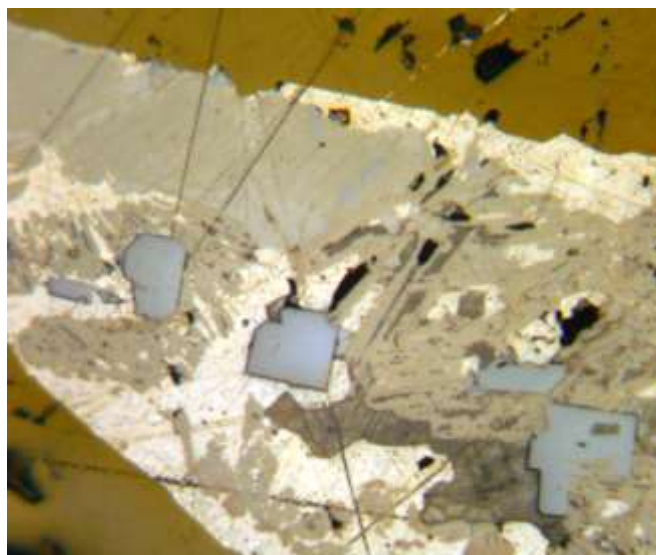


Рис. 8. Группа кубических метакристаллов сперрилита в агрегате паоловита (коричневатый), алтаита (серый), фрудита (белый) среди халькопирита. В отражённом свете при 1 николе. Ширина поля зрения 0.5 мм. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. -430 м.
Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

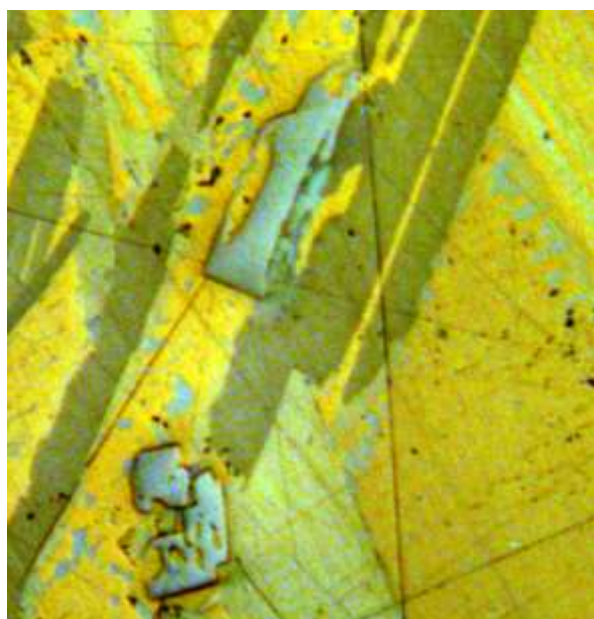


Рис. 9. Метакристаллы сперрилита сложной формы (рельефные серые) в агрегате паоловита (перекрещивающиеся двойники полиморфного перехода кубический → ромбический), с мелкими вростками геверсита (голубоватые). В отражённом свете, николи х. Ширина поля зрения 0.4 мм. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. - 430 м.
Колл. и фото Э.М. Спиридонова

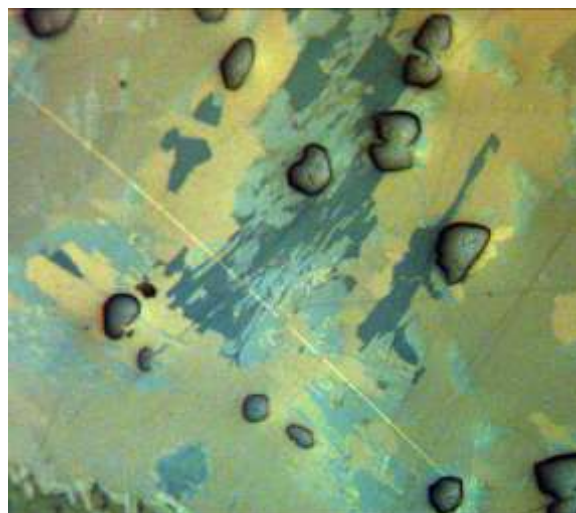


Рис. 10. Группа небольших метакристаллов сперрилита (рельефные серые) в агрегате паоловита (перекрещивающиеся двойники полиморфного перехода кубический → ромбический). В отражённом свете, николи х. Ширина поля зрения 0.3 мм. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. -430 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова

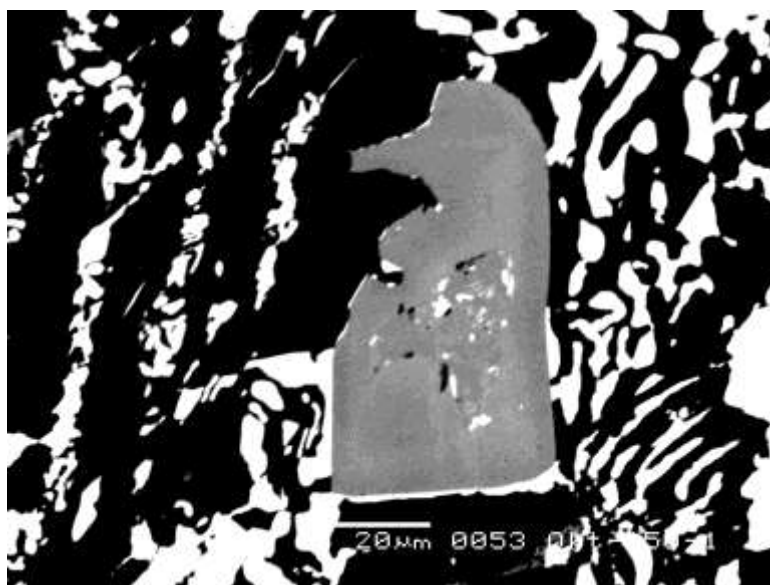


Рис. 11. Зональный метакристалл сперрилита сечёт срастание паоловита (чёрный) и геверсита $PtSb_2$ (белый). В центральной светлой зоне с массой реликтов замещённого геверсита сперрилит содержит 8.3 масс. % Sb. В отражённых электронах. Гнездо минералов благородных металлов в эвтектических рудах. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 810 м.

Сперрилит, заместивший Sb-паоловит и геверсит $PtSb_2$, содержит до 9 масс. % Sb (рис. 11, таблица). Как видно, талнахский сперрилит постоянно содержит микропримеси родия, олова, серьмы и теллура; периодически – примеси золота, меди и селена. Отдельные кристаллы сперрилита содержат до 0.9 масс. % Se [12]. Зональные по составу кристаллы редки, их центральные зоны обогащены сурьмой, заимствованной из замещённого геверсита

(рис. 11). Всё это характерно для небольших кристаллов, крупные же по составу очень близки к PtAs₂.

Таблица. Химический состав (масс. %) сперрилита Главной Хараелахской сульфидной залежи. Гор. – 430 м. ЭМЗ «Самебах», анал. И.М. Куликова

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	42
Pt	56.21	54.96	55.38	55.42	54.37	56.15	53.25	54.84
Pd	0.05	0.05	0.06	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Rh	0.16	0.09	0.23	0.17	0.07	0.05	0.05	0.37
Au	0.20	0.16	нпо	0.31	нпо	нпо	нпо	нпо
Cu	0.13	нпо	нпо	нпо	нпо	0.05	нпо	нпо
As	43.06	42.09	41.36	41.02	38.45	38.18	35.90	35.34
Sb	0.32	0.68	1.54	2.59	4.53	4.98	6.15	9.11
Bi	0.04	0.12	нпо	нпо	нпо	нпо	нпл	0.22
Sn	0.10	0.14	0.14	0.57	1.45	1.78	1.99	0.88
Te	0.04	0.27	0.05	0.18	0.17	0.14	0.09	0.69
сумма	100.31	98.56	98.76	100.26	99.04	101.33	97.43	101.45
Число атомов в формуле								
Pt	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	1.01	1.00	1.00
Rh	0.00 ₅	0.00 ₅	0.01	0.00 ₅	0.00 ₅	-	-	0.01
Au	0.00 ₅	0.00 ₅	-	0.00 ₅	-	-	-	-
Cu	0.00 ₅	-	-	-	-	-	-	-
сумма	1.00 ₅	1.00	1.01	1.00	0.99 ₅	1.01	1.00	1.01
As	1.98	1.97	1.94	1.90 ₅	1.82 ₅	1.79	1.75	1.67
Sb	0.01	0.02	0.04 ₅	0.07 ₅	0.13 ₅	0.14	0.18	0.27
Sn	0.00 ₅	0.00 ₅	0.00 ₅	0.01 ₅	0.04	0.06	0.07	0.03
Te	-	0.00 ₅	-	0.00 ₅	0.00 ₅	-	-	0.02
сумма	1.99 ₅	2.00	1.99	2.00	2.00 ₅	1.99	2.00	1.99

• **Преобразование сперрилита.** Т.Л. Евстигеева изучила каймы платины на кристаллах сперрилита и назвала процесс замещения – деарсенизацией [4]. В нашей работе [35] показано, что деарсенизация сперрилита, маякита и иных арсенидов палладия порождена процессами эпигенетического низкоградного метаморфизма.

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

1. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Вяльсов Л.Н., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, **1981**. 234 с.
2. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат. **1959**. 89 с.
3. Годлевский М.Н. Магматические месторождения. В кн.: Генезис эндогенных месторождений. М.: Недра. **1968**. С. 7-83.
4. Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов И.Я. О деарсенизации сперрилита в природе // Минерал. ж. **1990**. Т. 12. № 3. С. 90-96.
5. Изох А.Э., Майорова О.Н. Родий-содержащий сперрилит из Номгонского комплекса (Монголия) // Докл. АН СССР. **1990**. Т. 313. С. 1212-1215.
6. Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Павлов Е.Г. О распаде природного твёрдого раствора в системе PbS - PbTe. В кн.: Упорядоченность и распад твердых растворов в минералах. М.: Наука. **1979**. С. 185-190.
7. Кулагов Э.А. Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-1: Дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, **1968**. 239 с.
8. Поляков Г.В., Чан Чонг Хоа, Акимцев В.А., Балыкин П.А., Нго Тхи Фьонг, Хоанг Хьу Тхань, Толстых Н.Д., Глотов А.И., Петрова Т.Е. Рудно-геохимическая специализация пермотриасовых ультрамафит-мафитовых комплексов Северного Вьетнама // Геология и геофизика. **1999**. Т. 40. № 10. С. 1474-1487.
9. Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. **2010**. Т. 51. С. 1356-1378.
10. Спиридонов Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс. **2019**. С. 41-113.
11. Спиридонов Э.М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. **2022**. № 6. С. 95-116.
12. Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Коротаева Н.Н., Егоров К.В., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Серова А.А. Меньшиковит Pd₃Ni₂As₃ и ассоциирующие минералы сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, Норильское рудное поле // Вестник МГУ. Серия геология. **2020**. № 4. С. 22–29.
13. Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Япаскурт В.О., Коротаева Н.Н. Норильское рудное поле: прямое доказательство пневматолитового генезиса минералов палладия в сплошных сульфидных рудах // Новые идеи в науках о Земле. **2019**. Т. II. С. 380-383.
14. Спиридонов Э.М., Голубев В.Н., Гриценко Ю.Д. Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. **2010**. № 8. С. 867-875.
15. Спиридонов Э.М., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Коротаева Н.Н., Серова А.А. Норильское рудное поле: новая метаморфогенно-гидротермальная минеральная ассоциация – беспримесные звягинцевит и серебро, хиббингит, Mn хиббингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных поторанитовых рудах // Вестник МГУ. Геология. **2022**. № 3. С. 70-82.
16. Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Платинисто-палладистый тетрааурикуприд и ассоциирующие минералы в рудах месторождения Норильск-1 // Геология рудных месторождений. **2003**. Т. 45. № 3. С. 267-277.

17. Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Коротаева Н.Н., Середка Е.В., Тушенцова И.Н., Беляков С.Н., Жуков Н.Н. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. **2015**. Т. 57. № 5. С. 447-476.
18. Степанов В.К. Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Тр.ЦНИГРИ. Вып. 162. **1981**. С. 13-19.
19. Степанов В.К., Туровцев Д.М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ, **1988**. Вып. 223. С. 86-94.
20. Barkov A.Y., Fleet M.E. An unusual association of hydrothermal platinum-group mineral from the Imandra layered complex, Kola peninsula, NW Russia // *Canad. Mineral.* **2004**. Vol. 42. P. 455-467.
21. Botelho N.F., Moura M.A., Peterson R.C., Stanley C.J., Silva D.V.G. Kalungaite, PdAsSe, a new platinum-group mineral from the Buraco do Ouro gold mine, Calacante, Goi's State, Brazil // *Mineral. Mag.* **2006**. Vol. 70. P. 123-130.
22. Cabri L.J., Laflamme J.H.G., Stewart J.M. Platinum-group minerals from Onverwacht. II. Platarsite, a new sulfoarsenide of platinum // *Canad. Mineral.* **1977**. Vol. 15. P. 385-388.
23. Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C. The timing and formation of platinum-group minerals from the Creighton Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Sudbury, Canada: early crystallization of PGE-rich sulfarsenides // *Econ. Geol.* **2010**. Vol. 105. P. 1071-1100.
24. Gervilla F., Papunen H., Kojonen K., Johanson B. Platinum-, palladium- and gold-rich arsenide from the Kylmäkoski Ni-Cu deposit (Vammala Nickel Belt, SW Finland) // *Mineral. Petrol.* **1998**. Vol. 64. P. 163-185.
25. Johan Z., Ohnenstetter M., Slansky E., Barron L.M., Suppel D. Platinum mineralization in the Alaskan- type intrusive complexes near Fifield, New South Wales, Australia. 1. Platinum-group minerals in clinopyroxenites of the Kelvin Grove Prospect, Owendale intrusion // *Mineral. Petrol.* **1989**. Vol. 40. P. 289-309.
26. Kinloch E.D., Peyerl W. Platinum-group minerals in various rock types of the Merensky Reef: genetic implications // *Econ. Geol.* **1990**. Vol. 85. P. 537-555.
27. Malitch K.N., Merkle R.K.W. Ru-Os-Ir-Pt and Pt-Fe alloy from the Evander goldfield, Witwatersrand basin, South Africa: detrital origin inferred from compositional and osmium-isotope data // *Canad. Mineral.* **2004**. Vol. 42. P. 631-650.
28. Moreno T., Prichard H.M., Lunar R., Monterrubio S., Fischer P. Formation of a secondary platinum-group mineral assemblage in chromitites from the Herbeira ultramafic massif in Cabo Ortegal, NW Spain // *Eur. J. Mineral.* **1999**. Vol. 11. P. 363-378.
29. Mostert A.B., Hofmeyr P.K., Potgieter G.A. The platinum group mineralogy of the Merensky Reef at the Impala platinum mines, Bophuthatswana // *Econ. Geol.* **1982**. Vol. 77. P. 1385-1394.
30. Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and explanation. Berlin - Heidelberg - N.Y. Springer: **2004**. 727 p.
31. Olivo G.R., Theyer P. Platinum-group minerals from the McBratney PGE-Au prospect in the Flin Flon greenstone belt, Manitoba, Canada // *Canad. Mineral.* **2004**. V. 42. P. 667-681.
32. Seabrook C.L., Prichard H.M., Fisher P.C. Platinum-group minerals in the Raglan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Cape Smith, Quebec, Canada // *Canad. Mineral.* **2004**. Vol. 42. P. 485-497.
33. Serova A.A., Spiridonov E.M. Three type of apatite in Noril'sk sulfide ores // *Geochemistry International.* **2018**. Vol. 56. № 5. P. 474-483.
34. Spiidonov E., Serova A., Belyakov S., Sereda E., Tuschentsova I. Gold as indicator of the formation history of noble-metal minerals in Noril'sk sulfide ore. Northern Siberia, Russia // *13Th Intern. Platinum Symp.* Polokwane, South Africa. **2018**. P. 178-179.
35. Spiridonov E.M., Serova A.A., Kulikova I. M., Korotaeva N.N., Zhukov N.N. Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia // *Canad. Mineral.* **2016**. Vol. 54. P. 429-452.

36. *Szymanski J.T.* The crystal structure of platarsite, $Pt(As,S)_2$, and a comparison with sperrylite, $PtAs_2$ // *Canad. Mineral.* **1979**. Vol. 17. P. 117-123.
37. *Tarkian M., Koopmann G.* Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Phinex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines // *Mineral. Deposita.* **1995**. Vol. 30. P. 39-47.
38. *Wagner P.A., Mellor E.T.* On platinum bearing hortonolite dunite of the Lydenburg district, Transvaal // *Trans. Geol. Soc. South Africa.* **1925**. Vol. 28. P. 1-18.

ПАЛОВИТ ГЛАВНОЙ ХАРАЕЛАХСКОЙ СУЛЬФИДНОЙ ЗАЛЕЖИ. ОКТЯБРЬСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. НОРИЛЬСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ

Э.М. Спиридонов, С.Н. Беляков (ст. геолог Октябрьского рудника),
Э.А. Кулагов (Норильский ГМК), асп. А.А. Машкина, студ. Ю.А. Иванова,
студ. К.В. Егоров, студ. Д.И. Наумов, Н.Н. Коротаева

Паоловит. Ромбический станнид палладия – паоловит Pd_2Sb открыла в рудах Главной Хараелахской залежи Т.Л. Евстигнеева [3]. Ею же выполнен синтез паоловита и установлена вероятная температура его образования – около $400^\circ C$ [7, 22]. Паоловит – относительно редкий минерал [1, 9, 10, 21, 25, 30]. Однако, его немало в малосульфидных рудах Бушвелда [23, 24, 27, 31], где паоловит заместил магматогенные брэггит Pt_3PdS_4 и высокоцит PdS . В норильских сульфидных рудах, особенно в Главной Хараелахской залежи Октябрьского месторождения – паоловит – один из главных минералов – концентраторов и носителей Pd [2, 11-13, 18, 33].

Норильское рудное поле расположено в северо-западном углу дорифейской Восточно-Сибирской платформы, в области краевых дислокаций [4, 5, 19, 20]. Рудное поле образуют южный Норильский и северный Талнахский рудные узлы. Плутоногенные Co-Ni-Cu сульфидные месторождения с крупнейшими ресурсами Pd, Pt, Au, Ag генетически связаны с интрузивами оливиновых габбро-норит-долеритов норильского типа [4,5,19,20], производных трапповой формации P_2-T_1 . Магматические сульфиды слагают вкрапленность в интрузивных породах, шпире, жилы и залежи в интрузивах и окружающих роговиках. Поскольку температура кристаллизации сульфидных расплавов ниже, чем у силикатных, при остывании рудоносных интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата в их нижние части и под интрузивы. Такова и Главная Хараелахская сульфидная залежь Талнахского рудного узла. Изотопный состав Pb в породах рудоносных интрузивов и в магматических сульфидных рудах и у минералов Pd и Pt в Норильском и в Талнахском рудном узлах заметно отличается [15]; талнахские заметно более радиогенные. Это – свидетельство генетических связей минералов Pd и Pt с сульфидными рудами, а руд – с конкретными интрузивами.

Главная Хараелахская сульфидная залежь размером около $3000 \times 1000 \times 5-75$ м, субширотного простирания, размещена в нижней части и, главным образом, под Хараелахским (Таймырским) интрузивом норильского типа [2,5,19,20]. Это – крупнейшее месторождение Pd на Земле, богатое Pt, Au, Ag. Низы залежи и её периферические части сложены скоплениями кристаллов Mss_1 , Mss_2 , заметно обогащённых серой; температура их кристаллизации ~ 1150 и $\sim 1100^\circ C$; среди продуктов их субсолидусных превращений преобладает сернистый – моноклинный пирротин Fe_7S_8 [6,12,13]. Поэтому, остальная часть залежи – центр и её верхние части, помимо

кристаллов Mss1, Mss2, сложены скоплениями кристаллов Iss1, Iss2, Iss3, Iss4, Iss5, недосыщенных серой; температура их кристаллизации от ~ 950 до $\sim 760^\circ \text{C}$; среди продуктов их субсолидусных превращений наряду с халькопиритом, кубанитом, пентландитом, обильны минералы группы халькопирита, недосыщенные серой, – талнахит $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{16}\text{S}_{32}$, моихукит $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{18}\text{S}_{32}$, путоранит $\text{Cu}_{17}(\text{Fe},\text{Ni})_{18}\text{S}_{32}$ [2,12,13,16]. Размер кристаллов Iss3 в центре Главной Хараелахской залежи достигает 35 см, кристаллов Iss4 и Iss5 в прикровельной части залежи – до 15 см, кристаллов пентландита (продукта распада Iss4 - Iss5) – до 6 см. При кристаллизации высокотемпературных сульфидных твёрдых растворов благородные металлы были включены в эти твёрдые растворы; при этом, Rh, Ru, Os, Ir – Mss-совместимые, Pt, Pd, Au, Ag – Iss-совместимые [27]. Соответственно, продукты субсолидусных превращений Mss - существенно пирротиновые руды не должны были бы содержать заметное количество минералов платины и палладия, а их там местами много, в частности, сперрилита PtAs_2 [28]. Это свидетельствует о флюидном перераспределении благородных металлов при формировании их минералов.

Уникальная особенность норильских месторождений – наличие поздних легкоплавких (Т крист. $\sim 550^\circ \text{C}$) эвтектик PbSss - Iss5 (или Iss4, Iss3) [11,18]. Сульфидные руды – эвтектические сростания PbSss - Iss слагают гнёзда и секущие жилы двух поколений мощностью от первых до 120 см и длиной от первых см до многих метров в различных частях залежей массивных сульфидных руд в интрузивных породах и роговиках, которые эти руды окружают. Значительное число таких гнёзд и жил развиты в прикровельной части Главной Хараелахской залежи. Причина их появления – обилие калия и когерентного свинца в норильских рудно-магматических системах [11]. Продукты субсолидусных превращений PbSss – матрица галенита и тельца распада алтаита; судя по составу продуктов распада, температура распада PbSss отвечала $425\text{-}415^\circ \text{C}$ [8]. Руды – эвтектические сростания PbSss - Iss экстремально богаты Pd, Pt, Ag, Au и их минералами [11-18]. Во многих рудных столбах Главной Хараелахской залежи преобладающая часть минералов Pd, Pt, Au, Ag находится в гнёздах и жилах эвтектических руд, либо у контакта таких жил [11-13, 18].

Норильские сульфидные расплавы были богаты флюидами (H_2O , K, Cl, F, CO, COS, CH_4 , P, Ba, Tl...). Каждое тело магматических сульфидов окружено ореолом флюидного воздействия из агрегатов титанистого биотита-флогопита, хлорапатита, фторапатита, амфиболов, ангидрита, магнетита и/или титаномагнетита, джерфишерита [2,4,5,6,11-18,27,32,33]. Масштаб ореола коррелирован с размером тел сульфидов, около крупных залежей ширина ореола превышает 10-15 м. Ареал распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных тел и совпадает с ореолами флюидного воздействия около сульфидных тел. Так, в 6 м выше кровли

Главной Хараелахской залежи среди роговиков в гнезде биотита и амфибола без сульфидов нашли 8 мм кристалл сперрилита [12].

Для норильских руд типичны соотношения – $Pd:Pt = 3\div 4$, $Ag:Au = 30\div 40$. Преобладающая часть Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами, часто микронного размера [11-13, 18]. Часть Pd и Ag рассеяна в пентландите.

Несмотря на то, что изучение минералов благородных металлов в норильских рудах многие десятилетия проводили О.Е. Звягинцев, Е.В. Искюль, И.Н. Масленицкий, Э.А. Кулагов, А.Д. Генкин, И.В. Муравьёва, В.Д. Бегизов, Т.Л. Евстигнеева, С.Ф. Служеникин, Л.Н. Вяльсов, В.А. Коваленкер, А.Ю. Барков, А.И. Пономаренко, Н.С. Рудашевский, Э.М. Спиридонов и иные исследователи, мы только начинаем понимать реально сложную и длительную историю их формирования. Большинство геологов считают минералы благородных металлов норильских руд продуктами магматической кристаллизации. Уже в 1968 г. А.Д. Генкин показал, что часть этих минералов образовались при послемагматических процессах при участии флюидов. В дальнейшем многие исследователи доказали, что значительная часть минералов благородных металлов – метакристаллы [2,3,7 и др.]. Наши наблюдения показали, что вся масса минералов благородных металлов норильских руд образована путем замещения магматических сульфидных руд и прилегающих пород; эти минералы замещали структуры распада галенит - алтаит, при этом галенит очищался от телец алтаита, с метасомами этих минералов ассоциируют метасомы алтаита и метасомы хлорсодержащих сульфидов K-Tl: джерфишерита и талфенисита [11-18,33]. Эти факты – прямое доказательство флюидно-метасоматического, пневматолитового генезиса минералов Pd, Pt, Au, Ag в норильских сульфидных рудах. Пневматолитовые минералы Pd и Pt – интерметаллиды: станниды, висмутиды, куприды-станниды, плюмбиды и близкие теллуриды, арсениды, антимониды. С ними ассоциируют минералы Au-Cu и Au-Ag. В рудах присутствует когенин Fe_3C [2]. Таким образом, пневматолитовые минералы благородных металлов возникли в резко восстановительных условиях, при крайне низкой активности сульфидной серы и кислорода; вероятно, при участии карбониллов [26] (и/или фуллеридов) платиновых металлов при температуре менее $415-410^\circ C$. Это – температура распада PbS_{ss} [8] и верхний предел устойчивости тетрааурикуприда [29], с которым ассоциирует ряд минералов палладия и платины норильских руд [17].

Паоловит Главной Хараелахской сульфидной залежи. Э.М. Спиридонов выделил в истории образования пневматолитовых минералов Pd, Pt, Au, Ag норильских руд 7 стадий [12,13] и выявил регенерированную Pt-Pd-Ag минерализацию, порождённую эпигенетическим низкоградным метаморфизмом [34]. Паоловит входит в состав пневматолитовой минерализации 2, 3 и 5 стадий и в состав метаморфогенно-гидротермальной минерализации.

1 стадия. Одни из распространённых типов пневматолитовых минералов благородных металлов 1 стадии – метакристаллы эквиаомных интерметаллидов Pd, твёрдых растворов на основе Sb паоловита и паоловита $\sim (Pd,Pt,Au)_1(Sn,Sb,Bi,Te,Pb)_1$, предположительно кубических (рис. 1-4), которые реконструированы по продуктам распада.

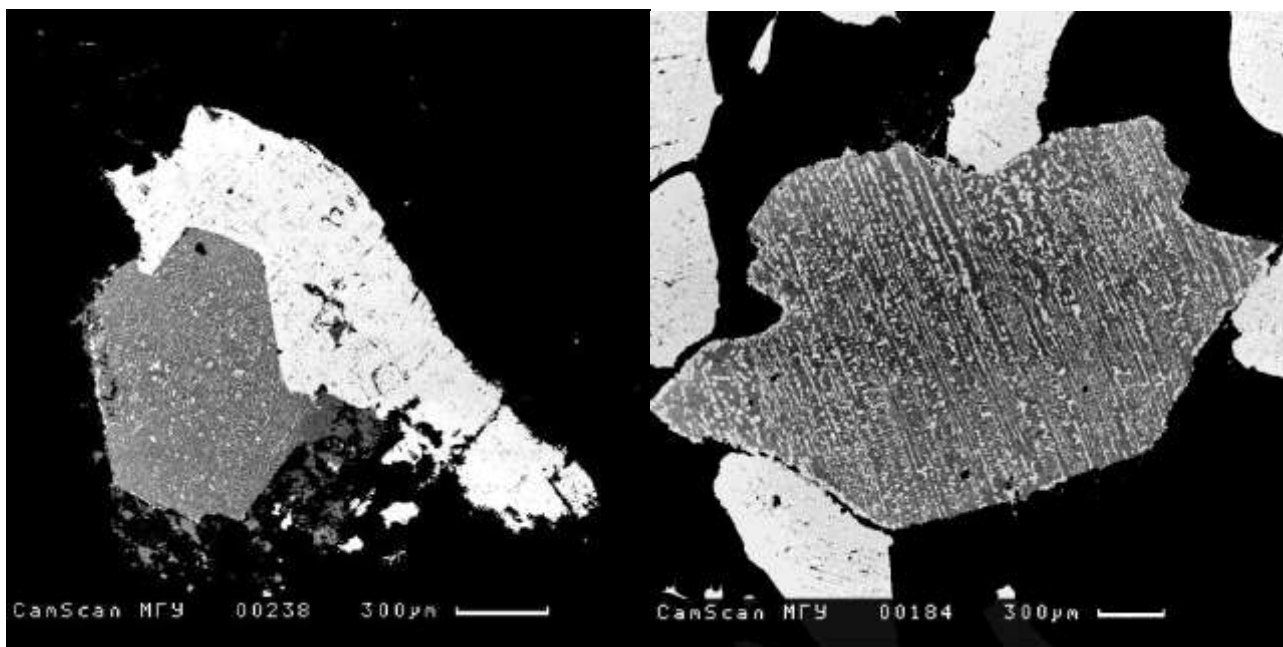


Рис. 1. Графические руды: светлый – галенит, чёрные – талнахит и пентландит. Метакристаллы эквиаомного твёрдого раствора на основе паоловита, испытавшие распад. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

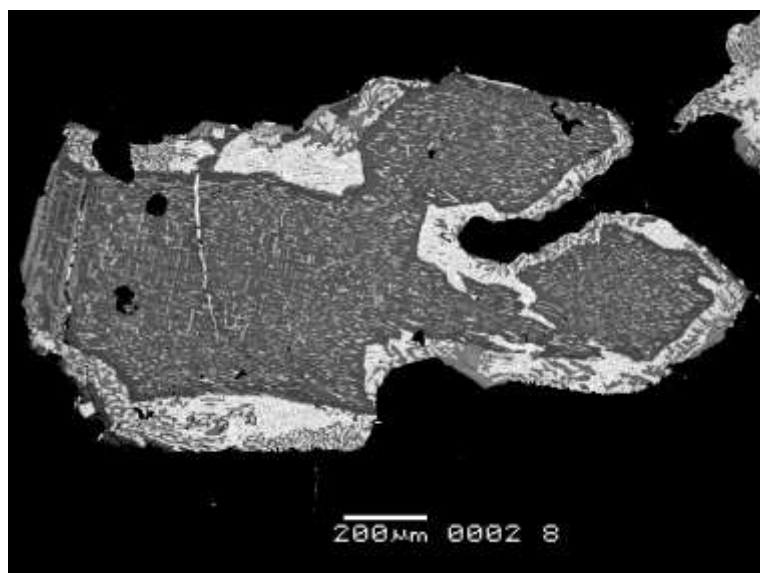


Рис. 2. Графические руды. Срастание метакристаллов эквиаомного твёрдого раствора на основе паоловита, испытавшие распад. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 530 м. В отражённых электронах.

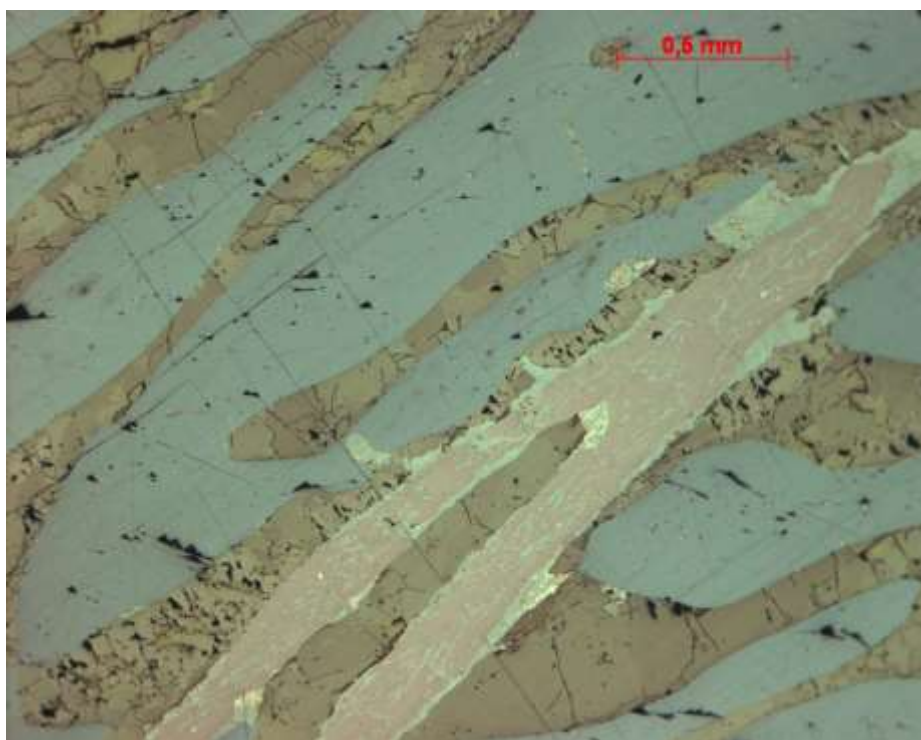


Рис. 3. Графические руды: галенит, талнахит, пентландит. Метакристалл сложной формы эквипотенциального твёрдого раствора на основе паоловита, испытавшие распад (розоватый). Главная Хараелахская залежь. Гор. – 750 м. В отражённом свете при 1 николе.

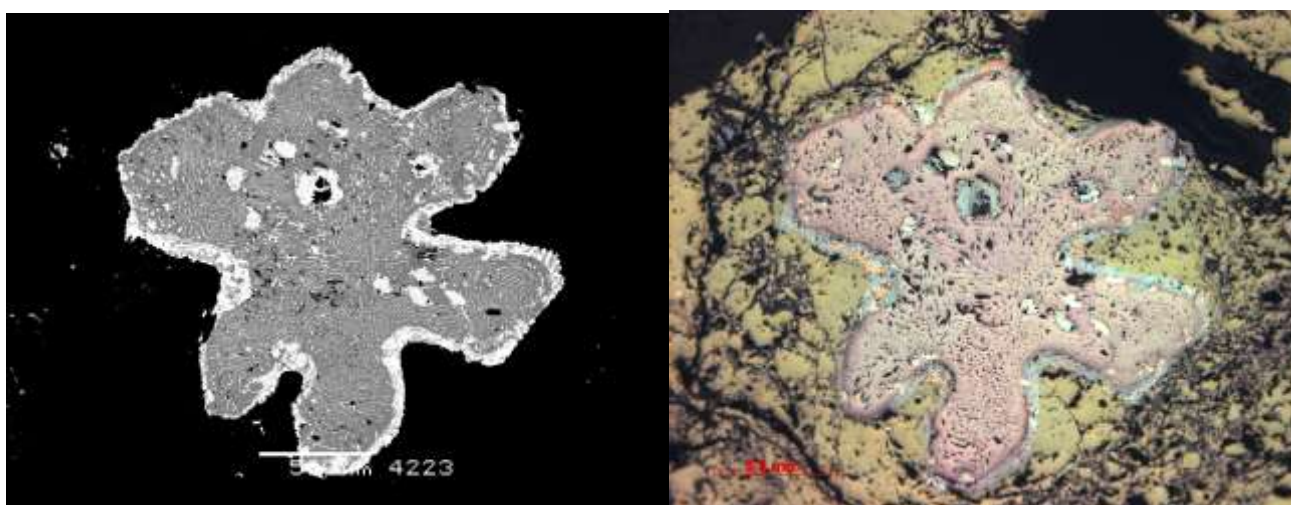


Рис. 4. Графические руды. Метакристалл - тройник эквипотенциального твёрдого раствора на основе паоловита, который испытал распад. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. Слева - в отражённых электронах, справа – в отражённом свете при 1 николе.

2 стадия. Заметная часть паоловита норильских руд возникла при твердофазном превращении ранних интерметаллидов на основе Sb паоловита, - полиморфном переходе кубическая фаза → ромбическая фаза = паоловит I генерации в сростании со Sb паоловитом, с образованием классических перекрещивающихся двойников полиморфного перехода (рис. 5-9).

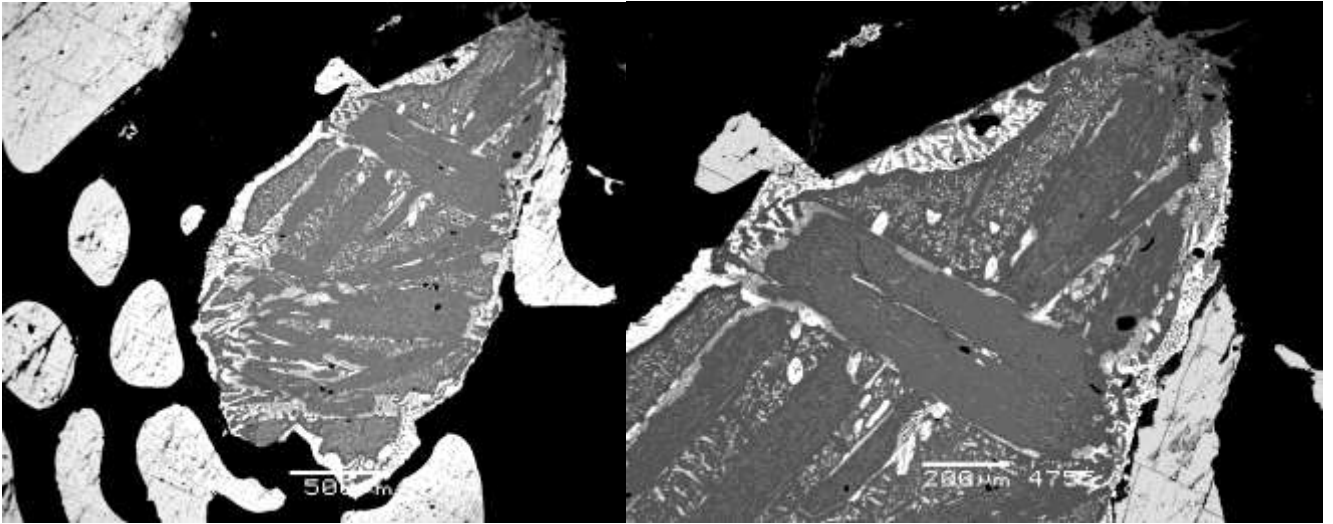


Рис. 5. Графические руды. Метакристалл экваторного интерметаллида на основе Sb-паоловита испытал твердофазный переход и превратился в систему перекрещивающихся двойников полиморфного перехода, сложенных паоловитом I. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. Слева – общий вид, справа – деталь. В отражённых электронах.

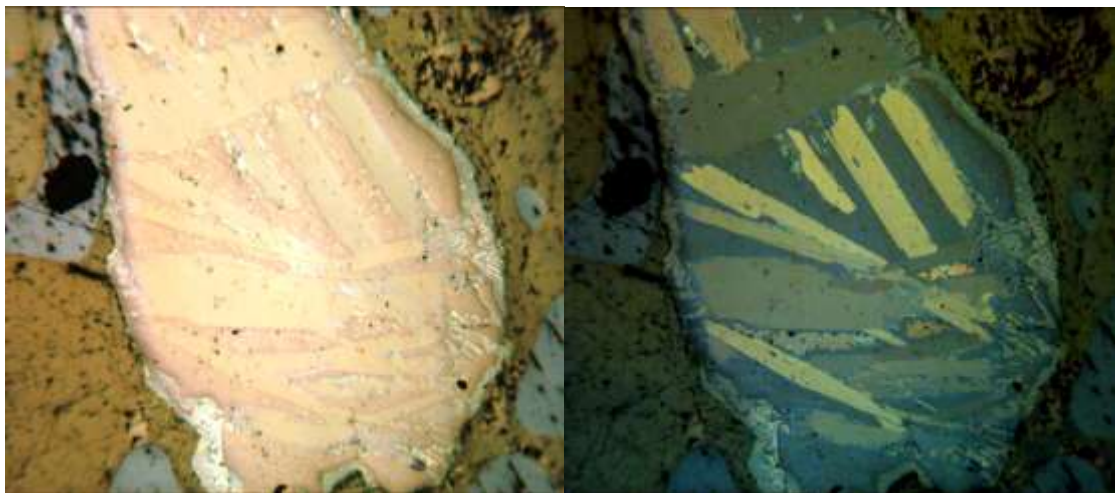


Рис. 6. Тоже сростание. Ширина поля зрения 2 мм. В отражённом свете, слева – при 1 николе, справа – николи х. Колл. и фото Э.М. Спиридонова и А.А. Машкиной.

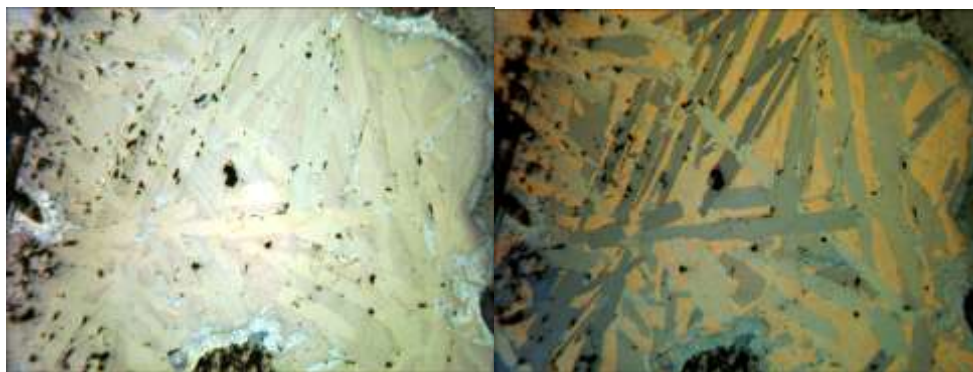


Рис. 7. Тот же образец. Аналогичное срастание. Ширина поля зрения 3 мм. В отражённом свете, слева – при 1 николе, справа – николи х. Колл. и фото Э.М. Спиридонова и А.А. Машкиной.

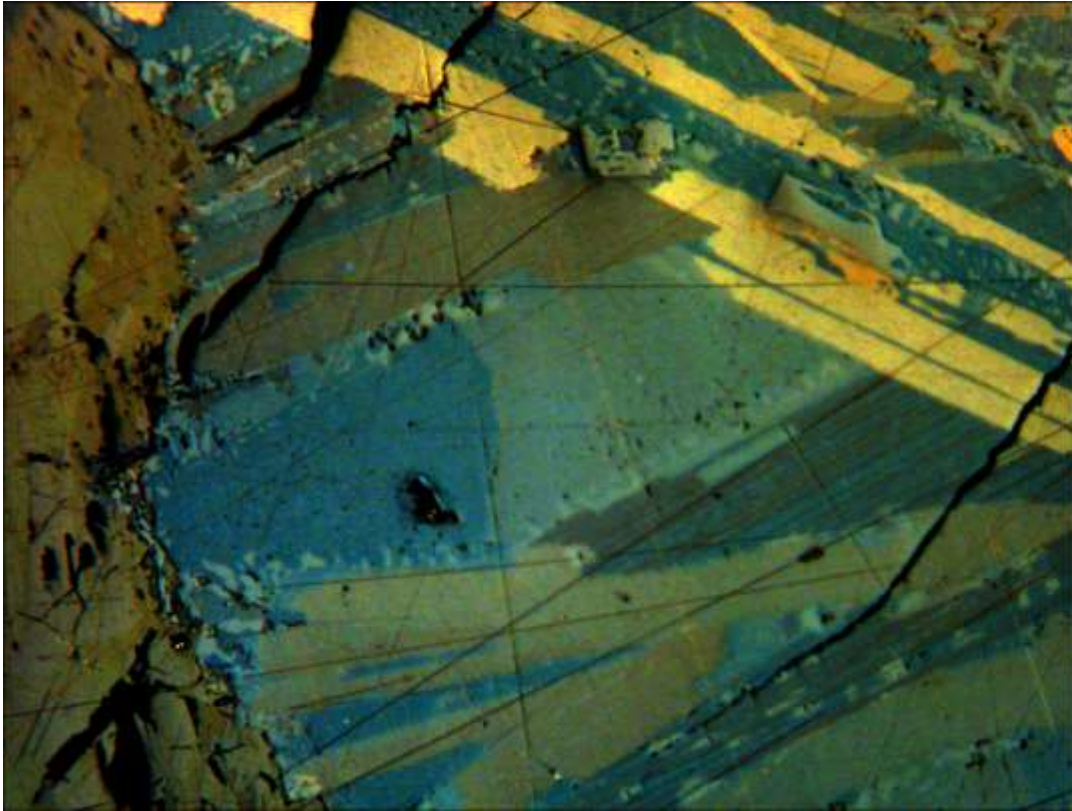


Рис. 8. Графические руды. Метакристалл эквиполярного интерметаллида на основе Sb-паоловита испытал твердофазный переход и превратился в систему перекрещивающихся двойников полиморфного перехода, сложенных паоловитом I. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. В отражённом свете, николи х. Колл. и фото Э.М. Спиридонова и А.А. Машкиной.

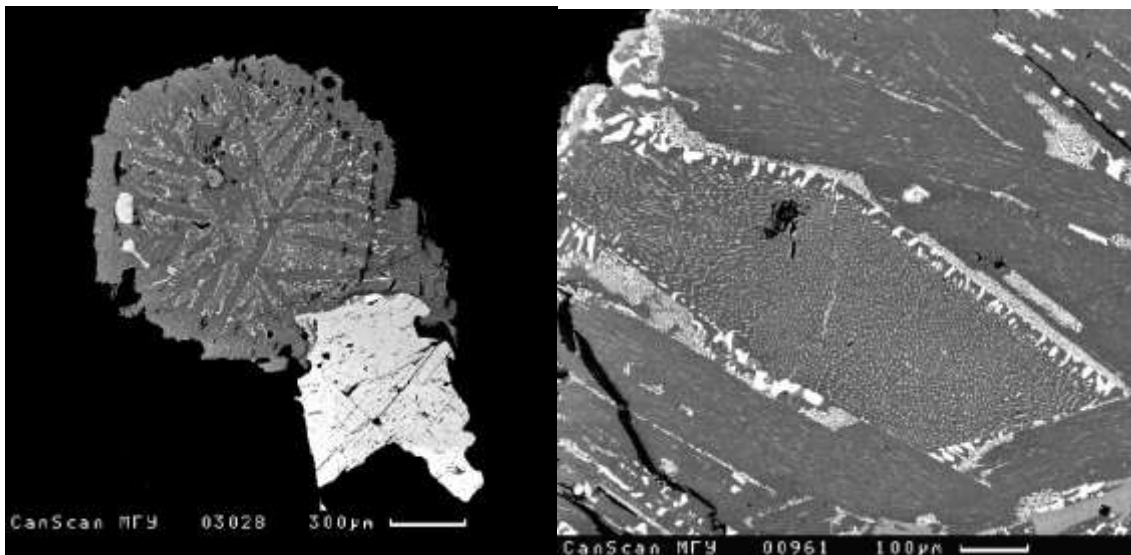


Рис. 9. Графические руды – галенит (белый), моихукит и пентландит (чёрные), левый снимок. Метакристаллы эквиполярного интерметаллида на основе Sb-паоловита испытали твердофазный переход и превратились в системы перекрещивающихся двойников

полиморфного перехода, сложенных паоловитом I. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 530 м.
В отражённых электронах.

Эквиатомный твёрдый раствор на основе паоловита испытал твердофазное превращение: гомогенная кубическая фаза в ряде кристаллов распалась и превратилась в систему блоков, одни из которых обогащены Pd, другие - Pt (рис. 10-11).

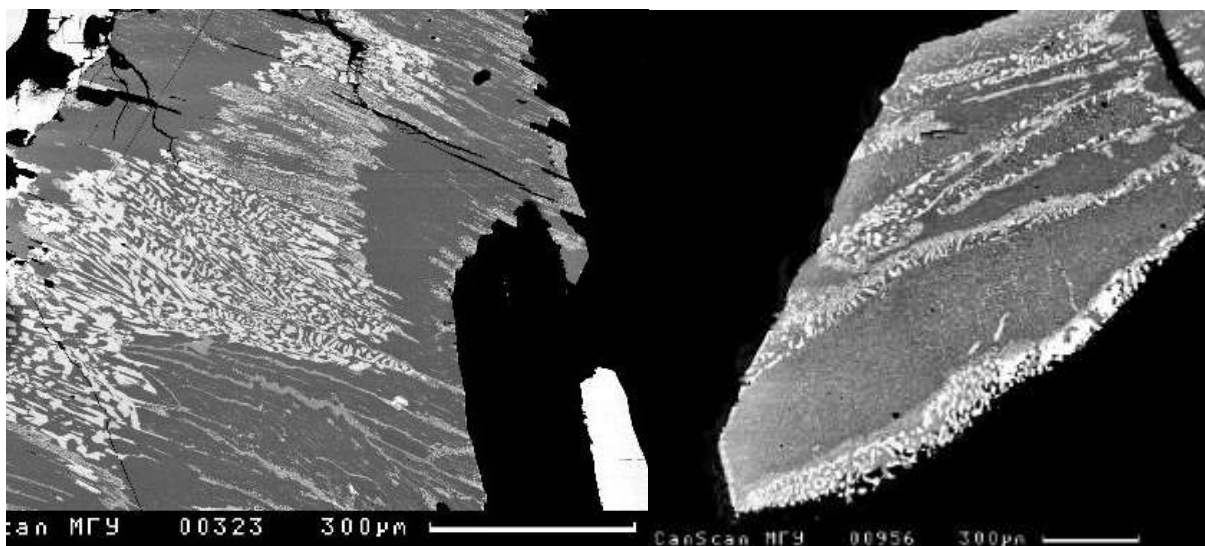


Рис. 10. Графические руды. Метакристаллы эквиатомного твёрдого раствора на основе паоловита, испытавшие распад на блоки, богатые Pd (серые), и блоки, богатые Pt (светлые).
Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

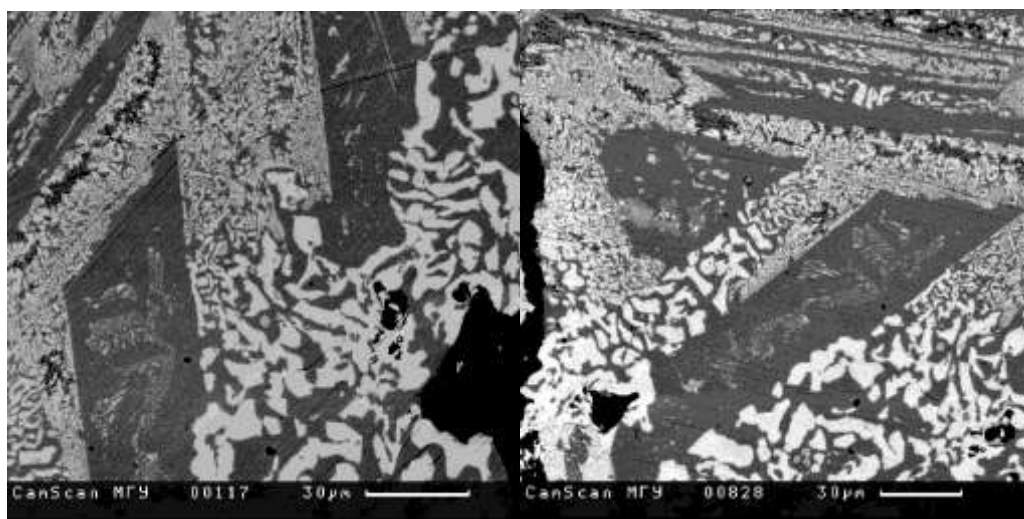


Рис. 11. Графические руды. Метакристаллы эквиатомного твёрдого раствора на основе паоловита, испытавшие распад на блоки, богатые Pd (серые), и блоки, богатые Pt (светлые).
Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 750 м. В отражённых электронах.

В дальнейшем и в «блокированных» кристаллах, и в неблокированных возникли двойники полиморфного перехода, каждый из которых в матрице паоловита I содержит свою

систему тонких ламелл распада дихалькогенидов платины – геверсита $Pt(Sb,Bi)_2$ и инсизвайта $Pt(Bi,Sb)_2$ и более крупных телец распада нигглиита $PtSn$ (рис. 12-15).

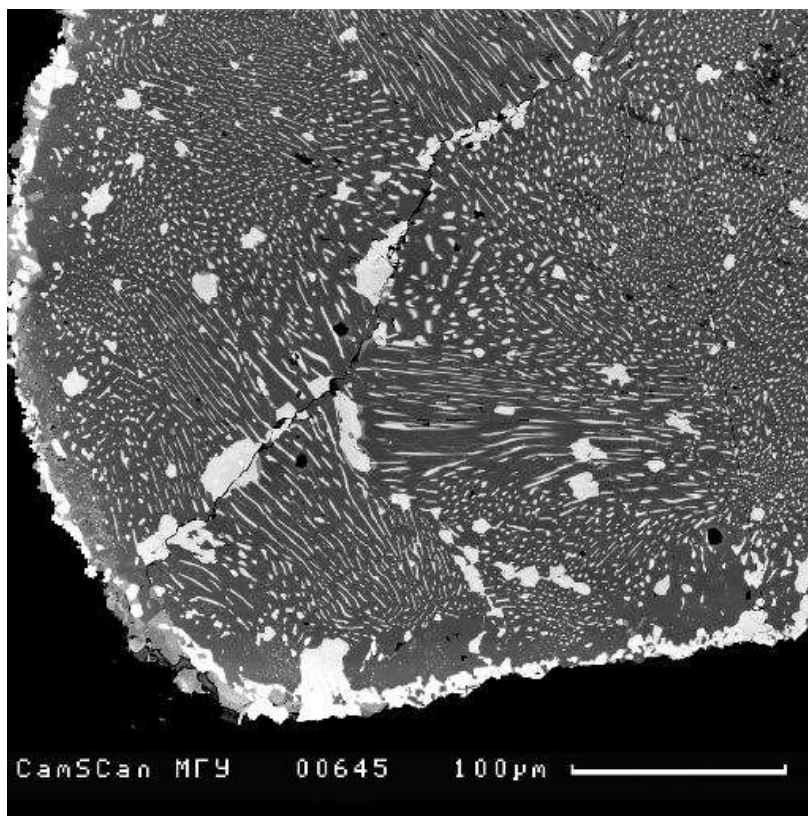


Рис. 12. Графические руды. Метакристалл экваторного твёрдого раствора на основе паоловита, который испытал полиморфный переход и превратился в систему блоков – двойников полиморфного превращения, каждый со своим рисунком тонких ламелл распада геверсита и инсизвайта (светлые) в матрице паоловита I (тёмно-серый). По границам блоков и частью в них -неправильной формы тельца распада нигглиита (светлые). Чёрное – моихукит. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

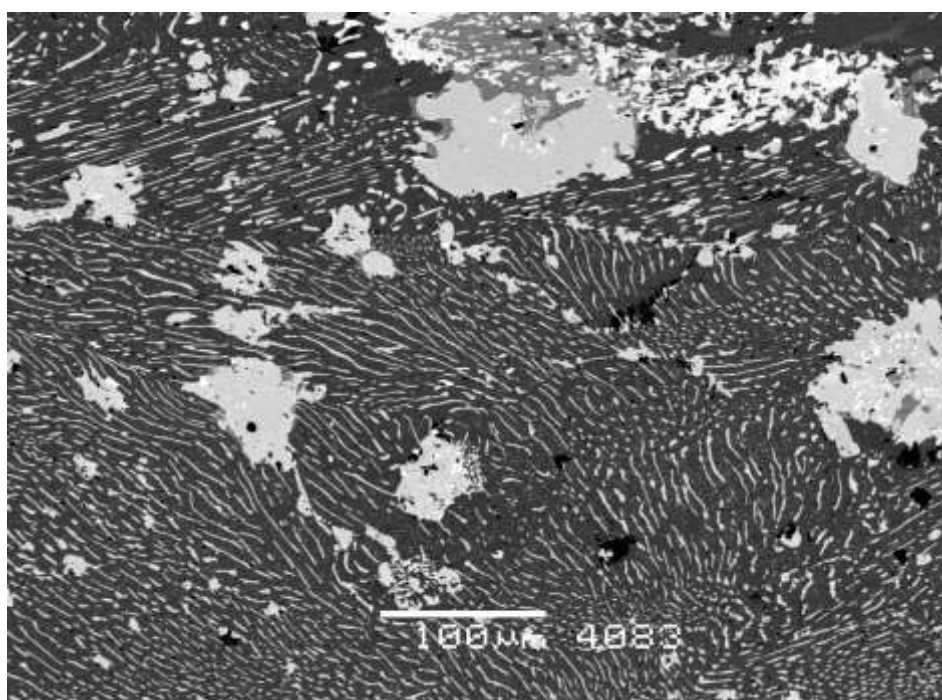


Рис. 13. Аналогичное образование. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. –530 м. В отражённых электронах.

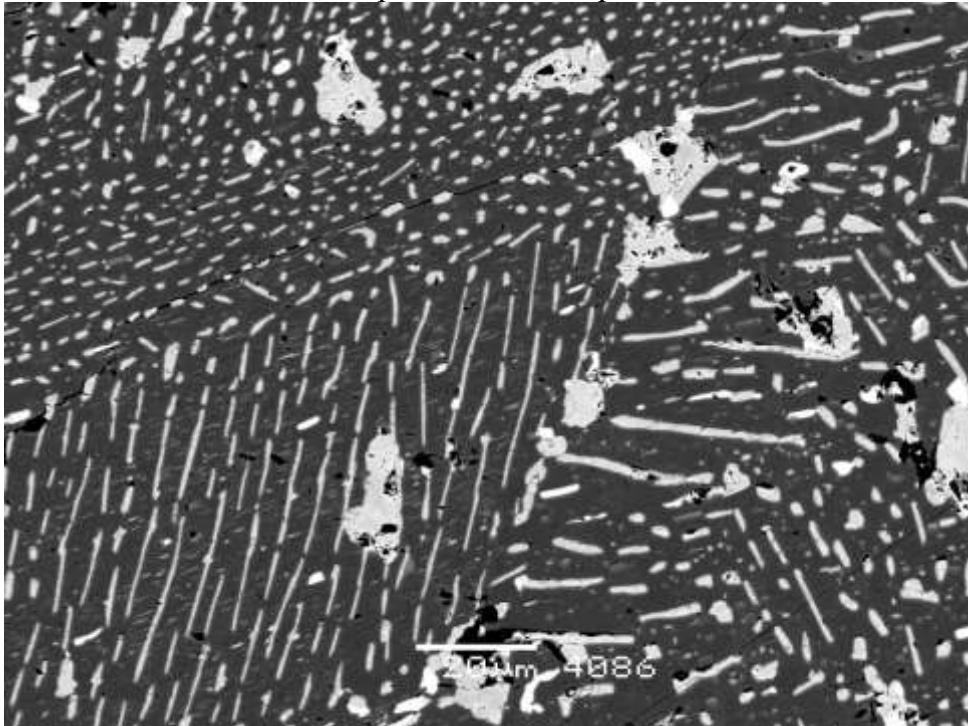


Рис. 14. Аналогичное образование. Деталь того же крупного кристалла раннего интерметаллида рисунка 13. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. –530 м. В отражённых электронах.

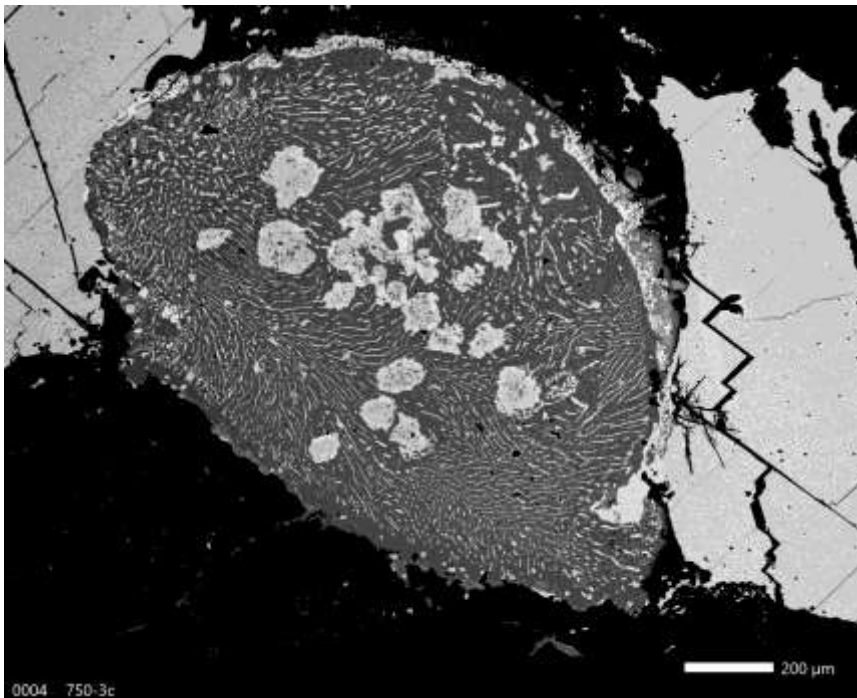


Рис. 15. Графические руды – галенит (со спайностью, светлый) и талнахит (чёрный). Овальный метакристалл эквиатомного твёрдого раствора на основе паоловита, который испытал полиморфный переход и превратился в систему блоков – двойников полиморфного

превращения, каждый со своим рисунком тонких ламелл распада геверсита и инсизваита (светлые) в матрице паоловита I (тёмно-серый). По границам блоков и частью в них - неправильной формы тельца распада нигглиита (светлые). Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 750 м. В отражённых электронах.



Рис. 16. Графические руды. Фрагмент блока - двойника полиморфного превращения. Матрица паоловита I. Две системы тонких ламелл распада геверсита и инсизваита (светлые), более ранние – более толстые. Главная Хараелахская залежь. Гор. –530 м. В отражённых электронах.

Таблица 1. Химический состав (масс. %) паоловита I - матрицы структур распада эквиаомного интерметаллидов на основе паоловита. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Горизонт - 430 м. Рисунок 12

Компоненты	1	2	3	4	5	6
Pd	56.14	57.59	58.07	58.82	59.31	58.89
Pt	10.03	9.54	6.80	6.33	5.42	4.66
Sn	31.08	31.25	30.77	31.14	31.23	31.52
Sb	3.16	3.43	3.34	3.66	3.41	3.10
Bi	нпо	нпо	0.10	нпо	нпо	0.07
сумма	100.41	101.81	99.08	99.95	99.37	98.24
Число атомов в формуле						
Pd	1.83	1.85	1.88	1.89	1.90	1.92
Pt	0.18	0.17	0.12	0.11	0.10	0.08
сумма	2.01	2.02	2.00	2.00	2.00	2.00
Sn	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.91
Sb	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09
сумма	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00

Примечание. Os, Ir, Rh, Au, Ag, Cu, Ni, Co, Pb, As, Cd, Tl, Hg – не обнаружены. Электронный микрозонд, анализ. Н.Н. Коротаяева.

Как видно, для паоловита I характерны существенные содержания платины (и отчётливое изоморфное замещение Pd – Pt) и сурьмы (и изоморфное замещение Sn – Sb). Содержания Pt и Sb в паоловите I не коррелированы. В целом, состав минерала стехиометричен.

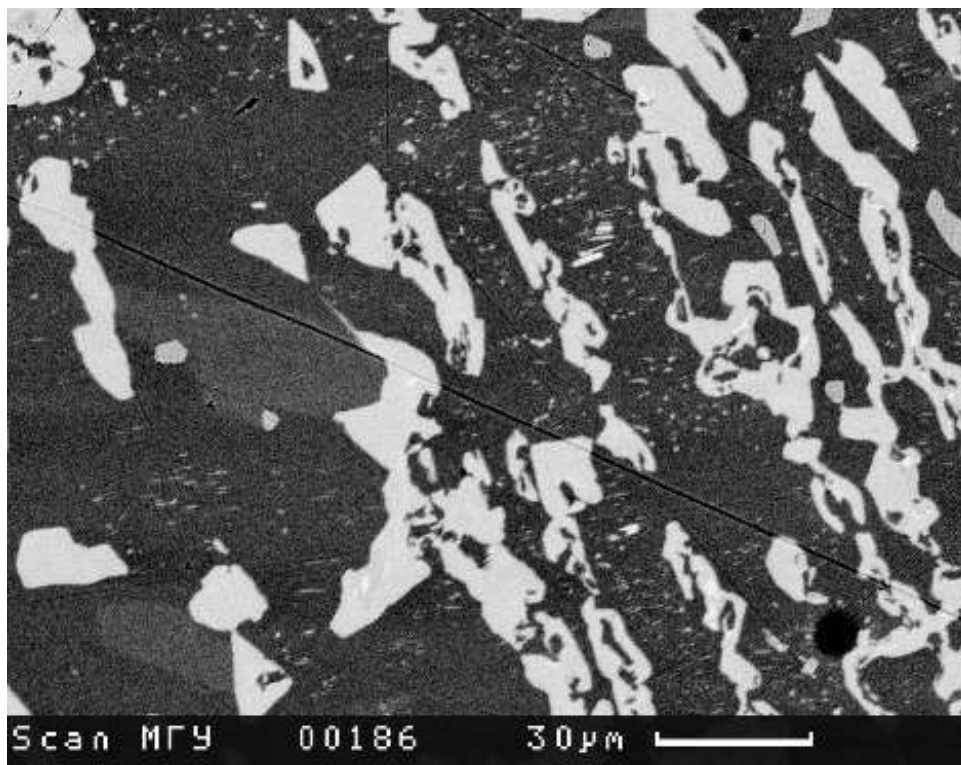


Рис. 17. Графические руды. Фрагмент блока – двойника полиморфного перехода из метакристалла эквиатомного интерметаллида на основе Sb-паоловита. Двухступенчатый распад твёрдого раствора. Матрица - золотосодержащий паоловит I, обогащённые золотом до 4.5 масс. % (табл. 2) участки – заметно более светлые, видны в левой части снимка. Более крупные тельца распада – инсизваит, мельчайшие – преимущественно геверсит. Главная Хараелакская залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

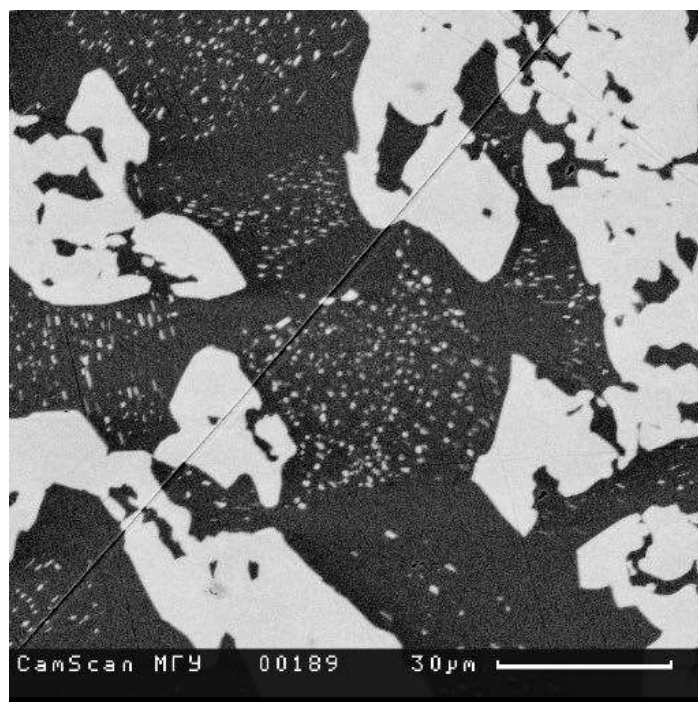


Рис. 18. Фрагмент тех же структур распада, того же образца, что на рисунке 17.

Таблица 2. Химический состав (масс. %) золотосодержащего паоловита I - матрицы структур распада эквиаомного интерметаллида на основе Sb-паоловита. Главная Хараелакская сульфидная залежь. Горизонт - 430 м. Рисунки 17, 18.

Компо- ненты	7	8	9	10	11	12	13	14
Pd	59.96	58.51	59.85	59.62	58.61	55.25	60.17	61.15
Pt	6.07	5.59	5.86	5.94	4.60	8.40	0.04	0.15
Au	0.10	0.17	0.21	0.37	0.38	2.31	4.44	4.68
Sn	33.09	32.31	33.67	33.02	32.89	33.63	33.92	32.93
Sb	2.25	1.79	1.55	2.02	1.64	0.44	0.70	2.94
Bi	0.17	нпо	0.12	0.10	нпо	нпо	нпо	0.18
сумма	100.64	98.37	101.26	101.07	98.12	100.06	99.17	102.03
Число атомов в формуле								
Pd	1.89	1.91	1.89	1.89	1.90	1.81	1.92	1.91
Pt	0.11	0.10	0.11	0.10	0.08	0.15	-	-
Au	-	-	-	0.01	0.01	0.04	0.08	0.08
сумма	2.00	2.01	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	1.99
Sn	0.94	0.94	0.96	0.94	0.96	0.99	0.98	0.92

Sb	0.06	0.05	0.04	0.06	0.05	0.01	0.02	0.09
сумма	1.00	0.99	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01

Примечание. Os, Ir, Rh, Ag, Cu, Ni, Co, Pb, As, Cd, Tl, Hg – не обнаружены. Электронный микронзонд, анал. Н.Н. Коротаева

Как видно, для паоловита I характерно существенное содержание Pt, кроме тех кристаллов, которые особо богаты Au, и заметное содержание Sb. Отчётливо проявлен изоморфизм Pd – Pt – Au и Sn - Sb. Минерал по составу стехиометричен.

3 стадия. Заметная часть паоловита норильских руд возникла при трансформации и при замещении структур распада ранних интерметаллидов на основе Sb паоловита и паоловита, а также раннего интерметаллида на основе соболевскита, в ходе 3 стадии формирования пневматолитовых минералов благородных металлов. Начали возникать типичные пластинчатые кристаллы паоловита. Вначале их форма только приближается к пластинчатой (рис. 19-21).

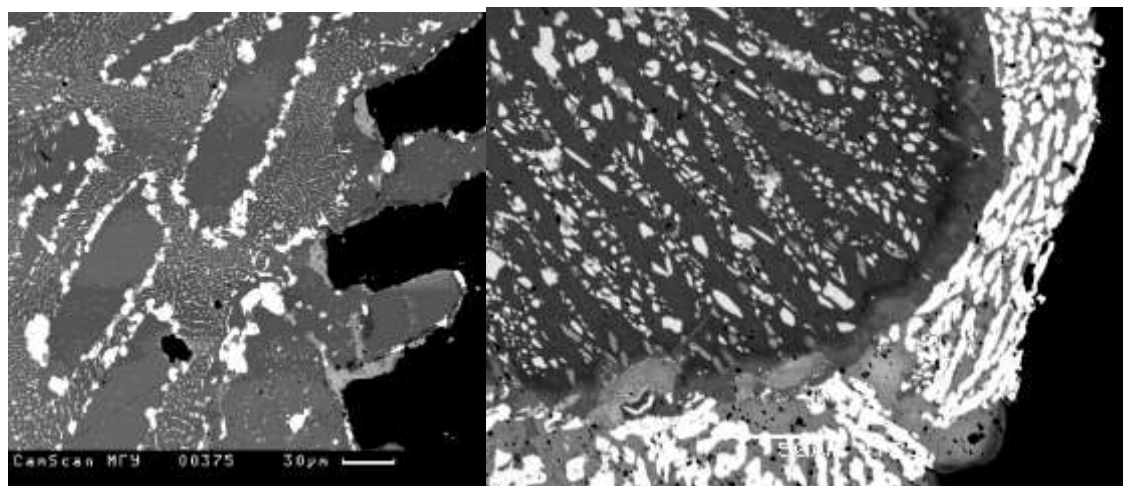


Рис. 19. Графические руды. Продукты трансформации метакристаллов экваторного интерметаллида на основе паоловита. Начало формирования пластин паоловита II без ламелл распада. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 530 м. В отражённых электронах.

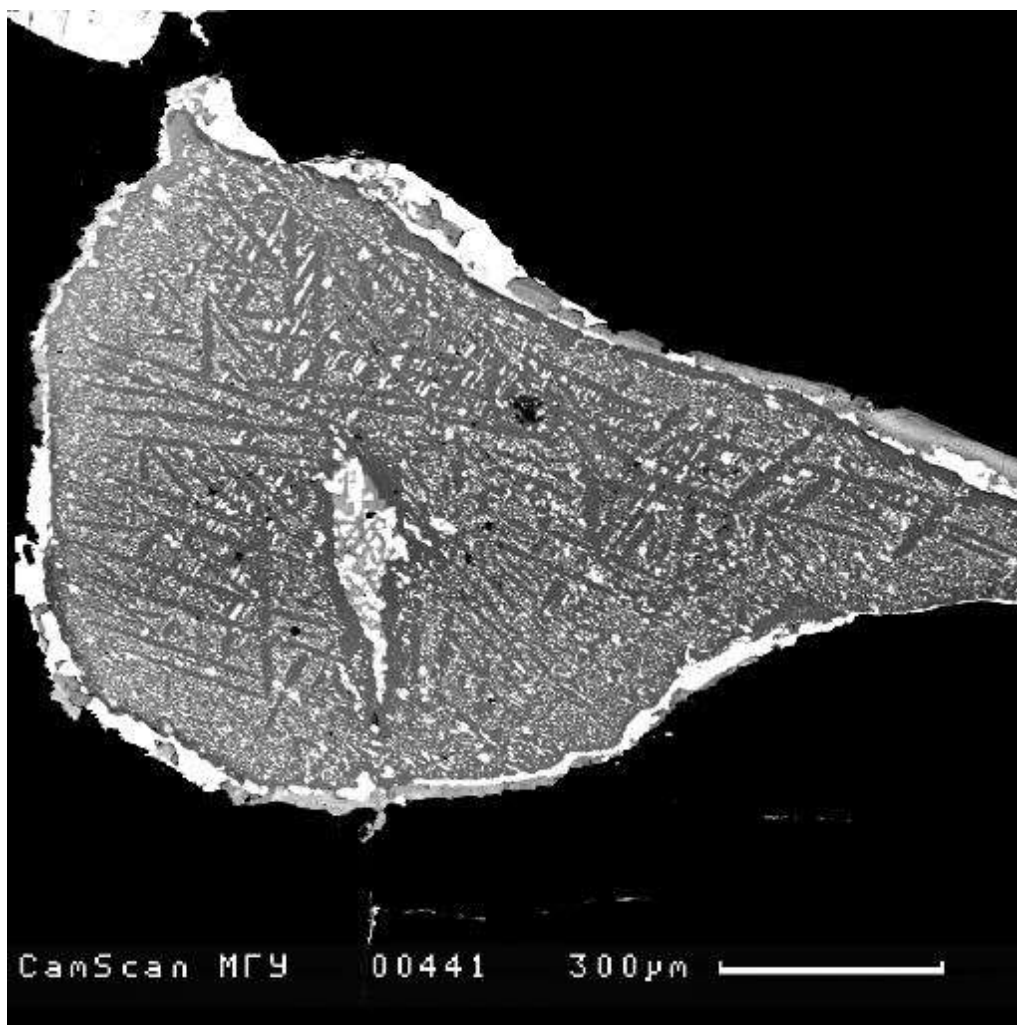


Рис. 20. Графические руды. Метакристалл экваторного интерметаллида на основе паоловита в агрегате халькопирита (чёрный). Продукты трансформации этого интерметаллида. Среди них начали формироваться пластины паоловита II без ламеллей распада. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

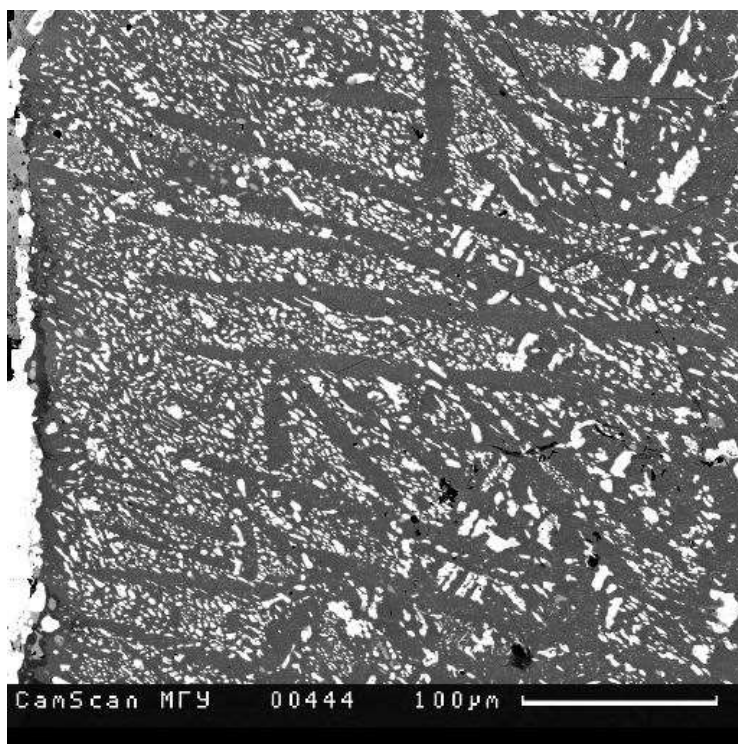


Рис. 21. Графические руды. Продукты трансформации метакристалла экваторного интерметаллида на основе паоловита. Среди них начали формироваться пластины паоловита II без ламелл распада. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

В дальнейшем произошла массовая кристаллизация пластинчатых кристаллов паоловита II генерации, которые слагают обособленные кристаллы, агрегаты кристаллов и срастания с геверситом II и инсизваитом II (рис. 22-26). Размер уплощённых кристаллов паоловита достигает 26х6 мм. Это самые крупные в Мире кристаллы паоловита (рис. 22),.



Рис. 22. Талнахитовые руды, богатые галенитом. Множество крупных метакристаллов паоловита III (розоватые). 92x92 мм. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 450 м. Колл. Е.В. Середы, фото Э.М. Спиридонова.

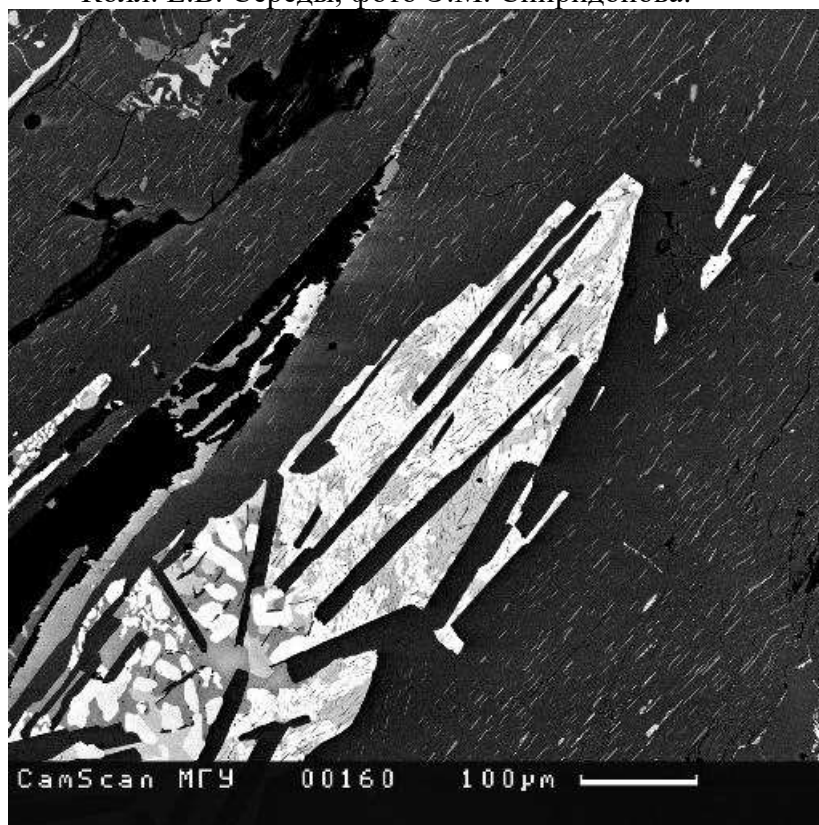


Рис. 23. Графические руды. Продукты трансформации метакристалла экваторного интерметаллида на основе паоловита. Агрегат пластин паоловита III (чёрный) в срастании с инсизваитом II (белый) и геверситом II (светло-серый) сечёт срастание кристаллов паоловита II. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

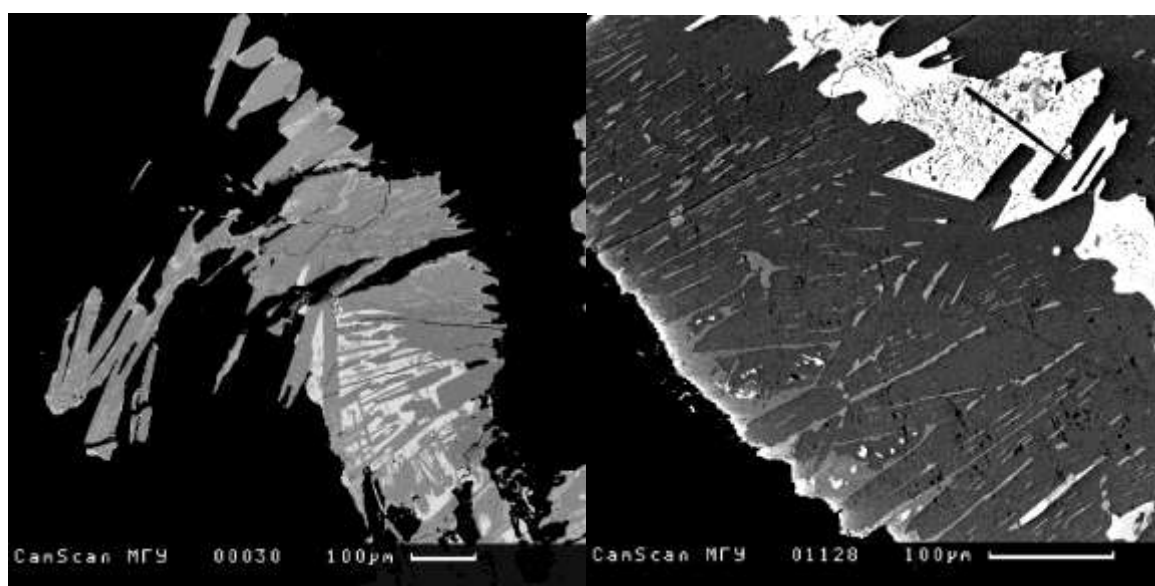


Рис. 24. Графические руды. В матрице моихукита (чёрный) сростания пластинчатых метакристаллов паоловита III (серые), местами в сростании с инсизваитом II (светлый). Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

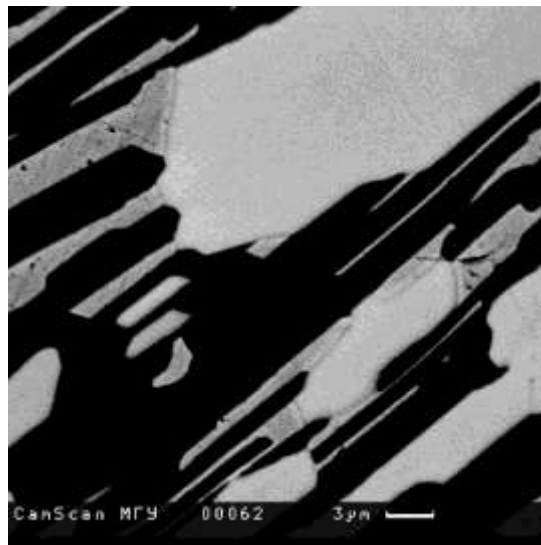


Рис. 25. Графические руды. Продукты трансформации метакристалла экваторного интерметаллида на основе паоловита. Агрегат пластин паоловита III (чёрный) в сростании с инсизваитом II (белый) и геверситом II (серый). Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 530 м. В отражённых электронах.

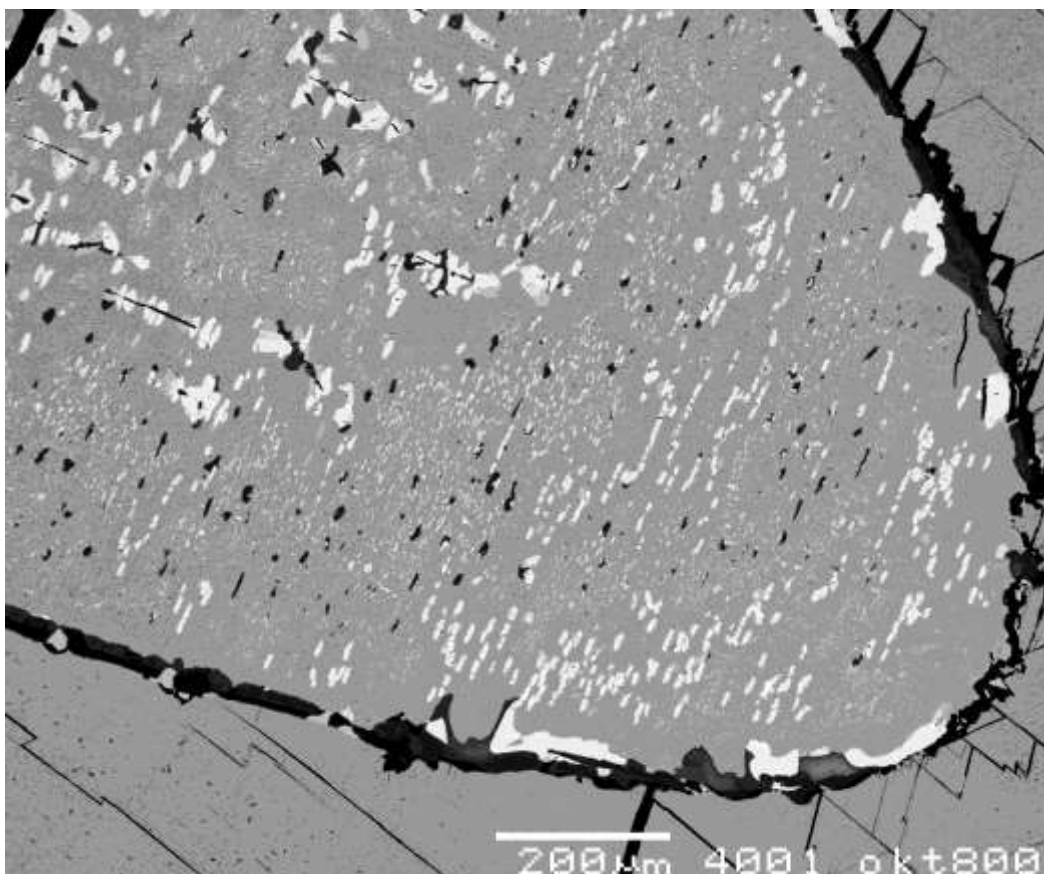


Рис. 26. Графические руды. Тонкие пластины паоловита III (чёрные) секут продукты трансформации метакристалла экваторного интерметаллида на основе соболевскита; секут матрицу соболевскита и ламелли распада – мончеита (светлые) и гессита (овальные чёрные).
Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 800 м. В отражённых электронах.
Нередко возникали несколько зарождений паоловита II (рис. 27-28).

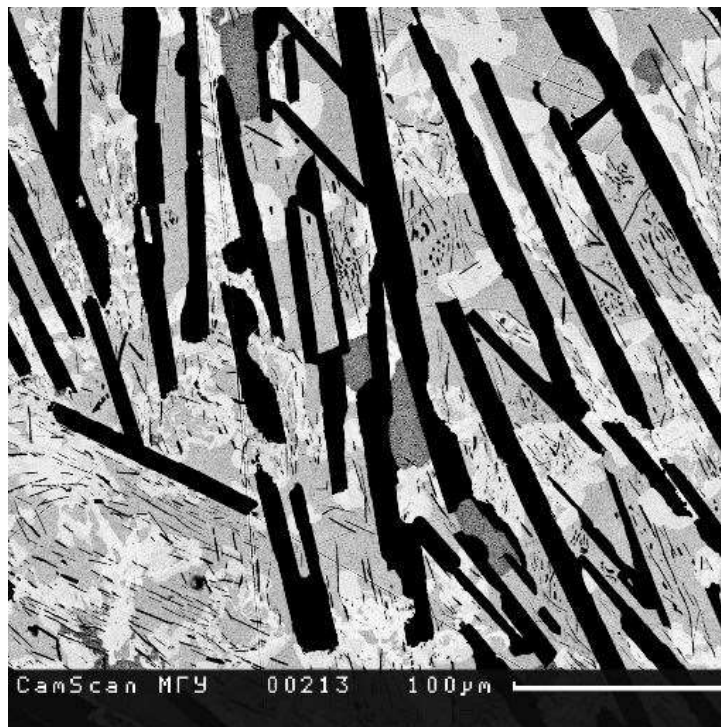


Рис. 27. Графические руды. Срастание пластинчатых кристаллов паоловита III не менее двух зарождений (чёрные) в срастании с инсизваитом II (светлый) и геверситом II (светло-серый).
Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 450 м. В отражённых электронах.

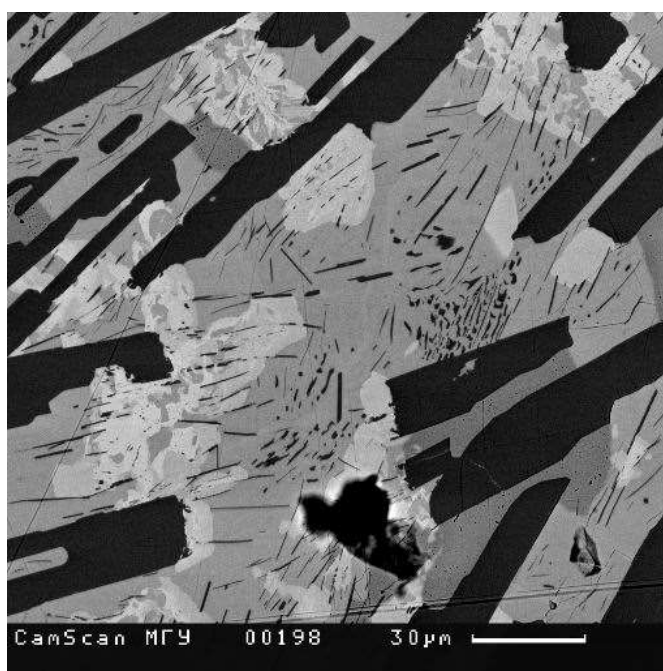


Рис. 28. Графические руды. Срастание пластинчатых кристаллов паоловита III не менее двух зарождений (чёрные) в срастании с инсизваитом II (светлый), геверситом II (светло-серый) и соболевскимитом (матрица). Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 450 м. В отражённых электронах.

Таблица 3. Химический состав (масс. %) паоловита III (пластинчатые кристаллы).

Главная Хараелахская сульфидная залежь. Гор. – 450 м. Рисунки 27-28

Компоненты	15	16	17	18	19
Pd	60.81	61.17	61.33	63.71	63.16
Pt	3.79	3.13	1.72	1.15	0.86
Sn	35.32	35.06	35.35	31.54	33.18
Sb	нпо	нпо	0.68	1.54	нпо
Bi	нпо	нпо	0.10	1.08	0.80
Te	0.86	0.58	0.67	0.94	0.89
Cd	0.42	0.29	0.26	0.36	0.37
Tl	0.46	0.61	0.69	0.79	0.54
сумма	101.57	100.84	99.70	101.11	99.80
Число атомов в формуле					
Pd	1.90	1.92	1.97	1.98	1.98
Pt	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02
сумма	1.96	1.97	2.00	2.00	2.00
Sn	1.00	0.99	0.94	0.90	0.95
Sb	-	-	0.02	0.04	-
Bi	-	-	-	0.01	0.01
Te	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Cd	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Tl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
сумма	1.04	1.03	1.00	1.00	1.00

Примечание. Os, Ir, Rh, Au, Ag, Cu, Ni, Co, Pb, As, Hg – не обнаружены. Электронный микронд, анал. Н.Н. Коротаева.

Как видно, паоловит III заметно отличается по составу от паоловита I и паоловита II – более низкими содержаниями Au, Sb и Pt и наличием небольших, но устойчивых примесей Te, Cd, Tl (табл. 3). Состав минерала в целом стехиометричен.

Среди образований четвёртой стадии формирования пневматитовых минералов благородных металлов, где много купридов – станнидов Pd – Pt (таймырит, станнопалладинит...), арсенидов Pd (маякит, меньшековит...), пюмбидов Pd (полярит...), минералов Au-Cu..., - паоловита нет.

5 стадия отделена от предыдущих заметной деформацией. Минеральные агрегаты 5 стадии нередко слагают прожилки в более ранних образованиях. Характерные минералы 5 стадии – электрум, кюстелит, фрудит, гессит, садбериит, соболевскит, мончеит, масловит, майчнерит, обильный алтаит; типичная форма выделений паоловита в сростании с перемешанными минералами – мелкие неправильной формы кристаллы (рис. 29-31).

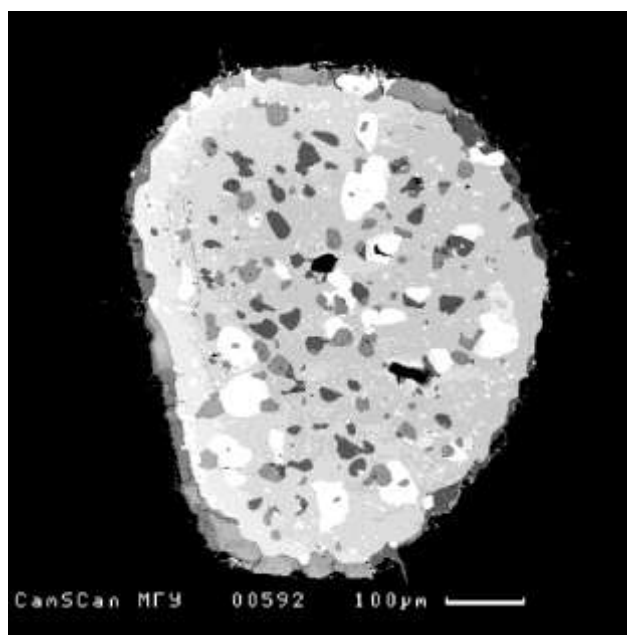


Рисунок 29. Графические руды. Метасоматическое гнездо минералов Pd-Pt-Au-Ag в талнахите (чёрное). Паоловит IV слагает небольшие включения (чёрные) в матрице Те соболевскита с массой включений электрума (серый), масловита (белые) и майчнерита (бело-серые). Главная Хараелахская залежь. Гор. -530 м. В отражённых электронах.

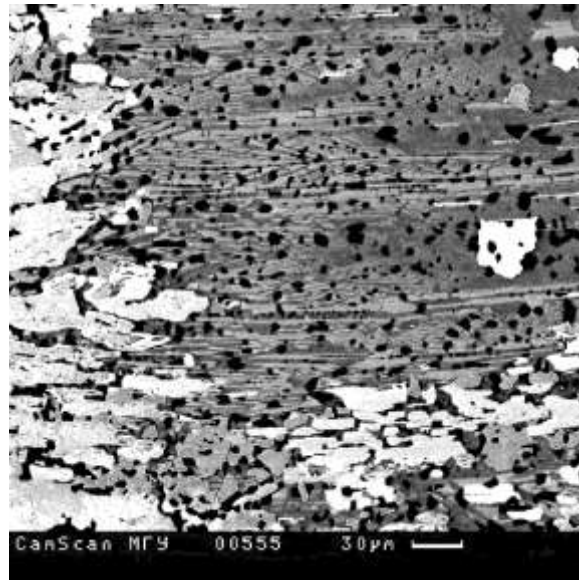


Рисунок 30. Графические руды. Метасоматическое гнездо минералов Pd-Pt. Паоловит IV слагает небольшие включения (чёрные) в матрице Те садбериита с пластинчатыми включениями мончеита и кристаллами фрудита (белый). Главная Хараелахская залежь. Гор. - 430 м. В отражённых электронах.

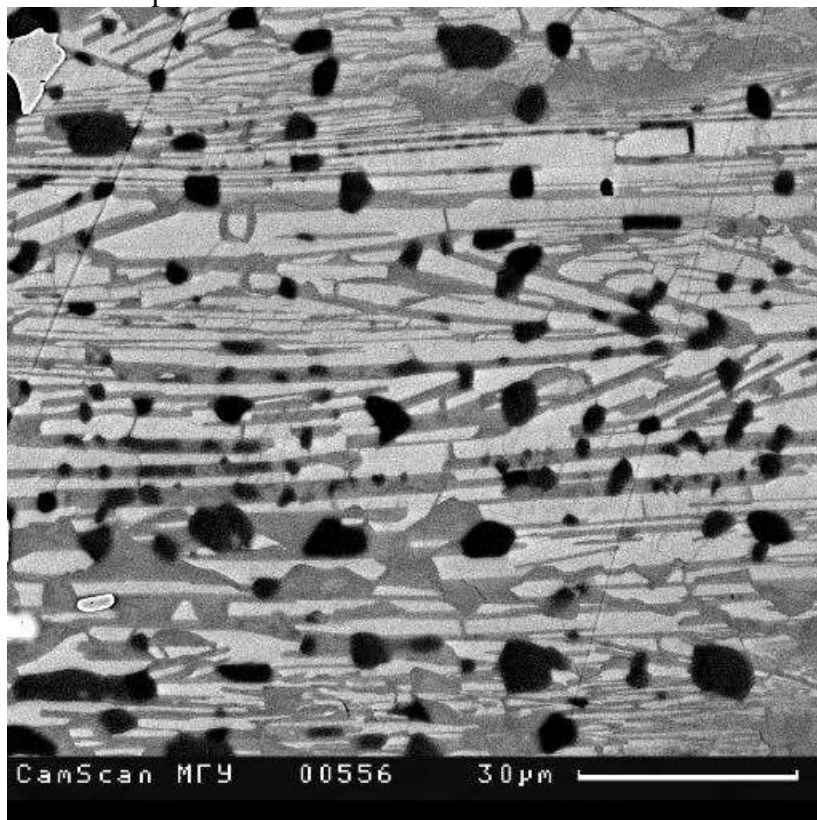


Рисунок 31. Фрагмент рис. 30. Паоловит IV слагает небольшие включения (чёрные) в матрице Те садбериита с пластинчатыми включениями мончеита. Главная Хараелахская залежь. Гор. - 430 м. В отражённых электронах.

Химический состав, масс. %, паоловита IV - ан. 20 и 21 (рис. 29): Pd 62.87 и 63.45; Pt 1.32 и 0.39; Au 0.45 и нпо; Sn 33.55 и 35.09; Sb 1.99 и 1.24; Bi 0.12 и 0.05; сумма 100.30 и 100.12, что

отвечает формулам – $(Pd_{1.97}Pt_{0.02}Au_{0.01})_2(Sn_{0.94}Sb_{0.06})_1$ и $(Pd_{1.97}Pt_{0.01})_{1.99}(Sn_{0.98}Sb_{0.03})_{1.01}$. Ru, Os, Ir, Rh, Ag, Te, Pb, Cd, Hg и Tl в составе паоловита IV не обнаружены. Состав – стехиометричен.

Среди образований 6 и 7 стадий в метакристаллах поздних инсизвайта и геверсита, сперрилита присутствуют реликты («объедки») паоловита I, II, III, IV; новообразованного паоловита нет.

Регенерированная метаморфогенно-гидротермальная минерализация. Горные породы и руды Норильского региона захвачены посттрапповым региональным низкоградным метаморфизмом, в процессе которого их минеральный состав заметно изменился [16,34]. Возникла небольшого масштаба регенерированная Pt-Pd-Ag минерализация. Флюидный режим и состав метаморфогенных флюидов были изменчивы. То преобладали щелочные флюиды с повышенным окислительным потенциалом, при этом пневматолитовый паоловит в метаморфизованных рудах замещал касситерит [34]. То преобладали флюиды с повышенной активностью сульфидной серы и за счёт вещества пневматолитовых минералов палладия – паоловита Pd_2Sn и иных – возникли высокоцит PdS и малышевит $CuPdBiS_3$ [34]. То преобладали восстановительные флюиды с низкой активностью сульфидной серы, при этом возник регенерированный паоловит в прожилках макинавита (рис. 32,33) [11,34].

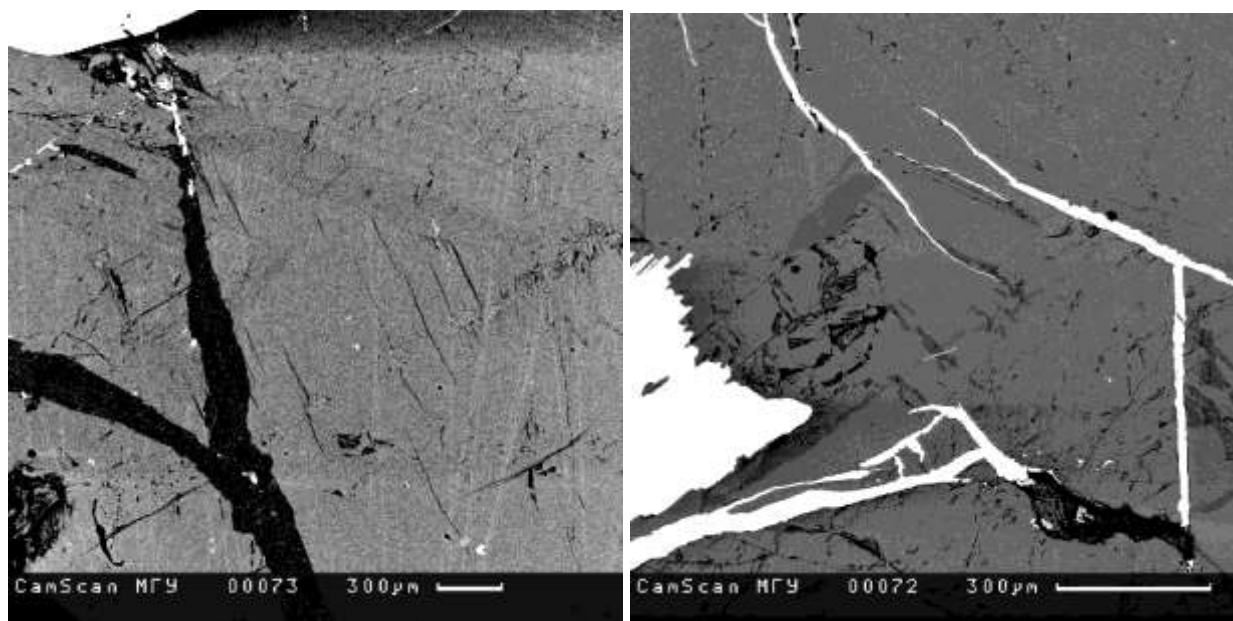


Рисунок 32. Метаморфизованные графические руды. Около трансформированных ранних интерметаллидов на основе паоловита (белые) в матрице халькопирита, кубанита и пентландита прожилки макинавита (чёрный) и регенерированного паоловита (белый). Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

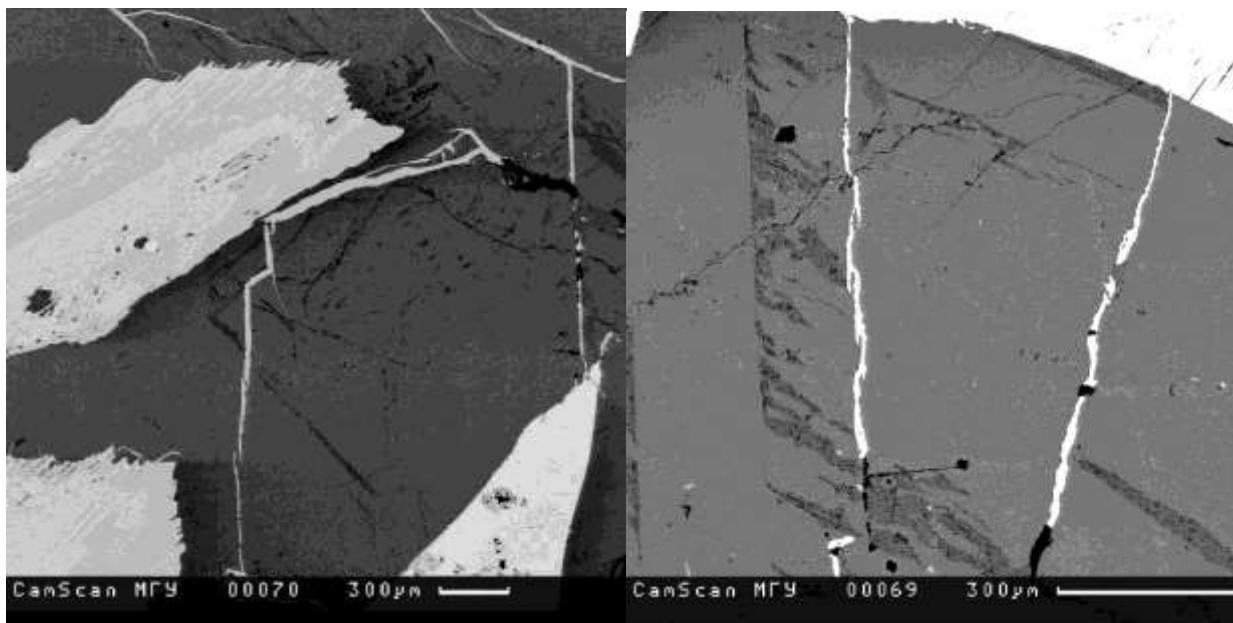


Рисунок 33. Метаморфизованные графические руды. Около трансформированных ранних интерметаллидов на основе паоловита (белые) в матрице халькопирита, кубанита и пентландита прожилки макинавита (чёрный) и регенерированного паоловита (белый). Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

Химический состав метаморфогенно-гидротермального паоловита – паоловита V близок к теоретическому - ан. 22, 23 и 24, масс. % (рис. 32, 33): Pd 63.68, 63.59 и 62.60; Sn 35.44, 35.49 и 36.18; Pb нпо, нпо и 0.09; сумма 99.12, 99.08 и 98.87, что отвечает формулам – $Pd_{2.00}Sn_{1.00}$, $Pd_{2.00}Sn_{1.00}$ и $Pd_{1.98}Sn_{1.02}$. Pt, Ru, Os, Ir, Rh, Au, Ag, Sb, Bi, Te, Cd, Hg и Tl в составе паоловита V не обнаружены.

Таким образом, в магматогенных Co-Ni-Cu рудах Главной Хараелахской залежи один из главных минералов палладия паоловит имеет пневматолитовый генезис и представлен ранними интерметаллидами эквиатомного состава, возможно кубическими (судя по морфологии кристаллов) и продуктами их твердофазных превращений и флюидной переработки – кристаллами ромбического паоловита четырёх генераций. Паоловит I обогащён платиной и сурьмой, ряд образцов – обогащён золотом. В ходе рудообразования состав паоловита постепенно приближался к теоретическому. В сульфидных рудах, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, установлены прожилки регенерированного паоловита в ассоциации с макинавитом; состав метаморфогенно-гидротермального паоловита отвечает теоретическому Pd_2Sn .

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

1. Богнибов В.И., Кривенко А.П., Изох А.Э. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов юга Сибири. Новосибирск: изд. СО РАН. **1995**. 151 с.
2. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Вьяльсов Л.Н., Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, **1981**. 234 с.
3. Генкин А.Д., Евстигнеева Т.Л., Вьяльсов Л.Н. Паоловит Pd_2Sn - новый минерал из медно-никелевых сульфидных руд // Геология рудных месторождений. 1974. Т. 16. № 1. С. 98-103.
4. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат. **1959**. 89 с.
5. Годлевский М.Н. Магматические месторождения. В кн.: Генезис эндогенных месторождений. М.: Недра. **1968**. С. 7-83.
6. Дистлер В.В., Служеникин С.Ф., Кабри Л.Дж., Криволицкая Н.А., Туровцев Д.М., Голованова Т.А., Мохов А.В., Кнауф В.В., Олешкевич О.И. Платиновые руды Норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // Геология рудных месторождений, **1999**. Т. 41. № 3. С. 241-265.
7. Евстигнеева Т.Л. Природные и синтетические соединения в системе Pd - Sn - Cu. В кн.: Сульфосоли, платиновые минералы и рудная микроскопия. М.: Наука, **1980**. С. 184-191.
8. Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Павлов Е.Г. О распаде природного твёрдого раствора в системе PbS - PbTe. В кн.: Упорядоченность и распад твердых растворов в минералах. М.: Наука. **1979**. С. 185-190.
9. Онеитетер Д., Ваткинсон Д.Х. Низкотемпературная эволюция парагенезисов PGM в интрузиве Ту Дак Лейк, комплекс Кодуэлл, Онтарио // VII Международ. платиновый симпозиум. М.: **1994**. С. 80-81.
10. Поляков Г.В., Чан Чонг Хоа, Акимцев В.А., Балыкин П.А., Нго Тхи Фьонг, Хоанг Хьу Тхань, Толстых Н.Д., Глотов А.И., Петрова Т.Е. Рудно-геохимическая специализация пермотриасовых ультрамафит-мафитовых комплексов Северного Вьетнама // Геология и геофизика. **1999**. Т. 40. № 10. С. 1474-1487.
11. Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. **2010**. Т. 51. С. 1356-1378.
12. Спиридонов Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс. **2019**. С. 41-113.
13. Спиридонов Э.М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. **2022**. № 6. С. 95-116.
14. Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Янакурт В.О., Коротаева Н.Н. Норильское рудное поле: прямое доказательство пневматолитового генезиса минералов палладия в сплошных сульфидных рудах // Новые идеи в науках о Земле. **2019**. Т. II. С. 380-383.
15. Спиридонов Э.М., Голубев В.Н., Гриценко Ю.Д. Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. **2010**. № 8. С. 867-875.
16. Спиридонов Э.М., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Коротаева Н.Н., Серова А.А. Норильское рудное поле: новая метаморфогенно-гидротермальная минеральная ассоциация – беспримесные звягинцевит и серебро, хиббингит, Mn хиббингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных поторанитовых рудах // Вестник МГУ. Геология. **2022**. № 3. С. 70-82.
17. Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Платинисто-палладистый тетраурикуприд и ассоциирующие минералы в рудах месторождения Норильск-I // Геология рудных месторождений. **2003**. Т. 45. № 3. С. 267-277.

18. *Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Коротаева Н.Н., Серeda Е.В., Тушенцова И.Н., Беляков С.Н., Жуков Н.Н.* Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. **2015**. Т. 57. № 5. С. 447-476.
19. *Степанов В.К.* Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 162. **1981**. С. 13-19.
20. *Степанов В.К., Туровцев Д.М.* Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ, **1988**. Вып. 223. С. 86-94.
21. *Чащин В.В., Петров С.В.* Малосульфидные платиновые руды габбро-анортозитового интрузива Волчьих тундр, Кольский полуостров, Россия // Геология рудных месторождений. **2013**. Т. 55. № 5. С. 359-382.
22. *Evstigneeva T., Moh G.H., Tarkian M.* Hydrothermal recrystallization of PGE- and Fe-Ni-sulfide assemblages // Neues Jahrb. Mineral. Abh. **1995**. Bd. 169. S. 273-277.
23. *Gasparrini E., Hiemstra S.A.* Paolovite (Pd₂Sn) from the Atok mine in the Merensky Reef // Trans. Geol. Soc. South Africa. **1975**. Vol. 78. P. 167-169.
24. *Hollwell D.A., McDonald I., Armitage P.E.B.* Platinum-group mineral assemblages in the Platreef at the South Central Pit., Sandstone mine, northern Bushveld Complex, South Africa // Mineral. Mag. **2006**. Vol. 70. P. 83-101.
25. *Li C., Naldrett A.J.* Platinum-group minerals from the deep copper zone of the Strathcona deposit, Sudbury, Ontario // Canad. Mineral. **1993**. Vol. 31. P. 31-44.
26. *McDonald I., Tredoux M., Lindsay N.M., Hart R.J., De Wit M.J.* Carbon monoxide and the volatile transport of the platinum group elements during magmatic processes // ICAM-91, Intern. Congr. Appl. Mineralogy. Pretoria: **1991**. Vol. 1. Chapter 34. P. 1-12.
27. *Naldrett A.J.* Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and explanation. Berlin - Heidelberg - N.Y. Springer: **2004**. 727 p.
28. *Naldrett A.J., Asif M., Gorbachev N.S., Kunilov V.E., Stekhin A.J., Fedorenko V.A. & Lightfoot P.S.* The composition of the Ni-Cu ores of the Oktyabr'sky deposit, Noril'sk region. In: Sudbury - Noril'sk Symposium, Ontario Geological Survey, **1994**. Spec. V. 5. P. 357-371.
29. *Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E.* The Au-Cu (gold - copper) system // Bull. Alloy Phase Diagrams. **1987**. V. 8. P. 453-474.
30. *Prichard H.M., Hutchinson D., Fisher P.C.* Petrology and crystallization history of multiphase sulfide droplets in a mafic dike from Uruguay: implications for the origin of Cu-Ni-PGE sulfide deposits // Econ. Geol. **2004**. Vol. 99. P. 365-376.
31. *Schwellnus J.S.J., Hiemstra S.A., Gasparrini E.* The Merensky reef at the Atok platinum mine and its environs // Econ. Geol. **1976**. Vol. 71. P. 249-260.
32. *Serova A.A., Spiridonov E.M.* Three type of apatite in Noril'sk sulfide ores // Geochemistry International. **2018**. Vol. 56. № 5. P. 474-483.
33. *Spiidonov E., Serova A., Belyakov S., Sereda E., Tuschentsova I.* Gold as indicator of the formation history of noble-metal minerals in Noril'sk sulfide ore. Northern Siberia, Russia // 13th Intern. Platinum Symp. Polokwane, South Africa. **2018**. P. 178-179.
34. *Spiridonov E.M., Serova A.A., Kulikova I. M., Korotaeva N.N., Zhukov N.N.* Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia // Canad. Mineral. **2016**. Vol. 54. P. 429-452.

НИГГЛИИТ ГЛАВНОЙ ХАРАЕЛАХСКОЙ СУЛЬФИДНОЙ ЗАЛЕЖИ. ОКТЯБРЬСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. НОРИЛЬСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ

**Э.М. Спиридонов, С.Н. Беляков (ст. геолог Октябрьского рудника),
Э.А. Кулагов (Норильский ГМК), студ. К.В. Егоров, асп. А.А. Машкина,
студ. Ю.А. Иванова, студ. И.Н. Куликов, студ. Д.И. Наумов, Н.Н. Коротаева**

Нигглиит. Гексагональный станнид платины – нигглиит PtSn был открыт в сульфидных Ni рудах Грикваленда, Южная Африка [23], уточненные данные о минерале приведены в работе [19]. Нигглиит – относительно мало распространённый минерал [18-22,27]. В малосульфидных рудах Бушвелда нигглиит заместил куперит и интерметаллиды Pt - Fe. Нигглиит широко распространён в Норильском рудном поле, особенно в Главной Хараелахской сульфидной залежи Октябрьского месторождения [1,2,5,8,15]. В норильских рудах, метаморфизованных в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций, новообразований нигглиита нет [26].

Норильское рудное поле расположено в области краевых дислокаций, в северо-западном углу дорифейской Восточно-Сибирской платформы, которая заметно отличается от остальной платформы [16,17]. Рудное поле образуют южный Норильский и северный Талнахский рудные узлы. Плутоногенные Co-Ni-Cu сульфидные месторождения с крупнейшими ресурсами Pd, Pt, Au, Ag, Rh сопряжены с интрузивами оливиновых габбро-долеритов норильского типа [3,4,7,16,17], – производные трапповой формации P₂-T₁. Магматические сульфиды слагают вкрапленность в интрузивных породах, шпире, жилы и залежи сплошных руд. Поскольку температура кристаллизации сульфидных расплавов ниже, чем у силикатных, при остывании интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата в их нижние части и под интрузивы [3-4,16,17,22]. Такова и Главная Хараелахская сульфидная залежь Октябрьского месторождения Талнахского рудного узла. Изотопный состав свинца как в породах рудоносных интрузивов, так и в магматических сульфидных рудах, а также у минералов Pd и Pt в Норильском и в Талнахском рудном узлах заметно отличается [12]; талнахские – заметно более радиогенные. Это – свидетельство генетических связей минералов Pd и Pt с сульфидными рудами, а руд - с конкретными интрузивами.

Главная Хараелахская сульфидная залежь размером ~3000x1000x5÷75 м, субширотного простирания, размещена в нижней части и главным образом под Хараелахским интрузивом норильского типа. Это – крупнейшее месторождение Pd на Земле, богатое и Pt, Au, Ag. Низы залежи и её периферические части сложены скоплениями кристаллов Mss1, Mss2, заметно обогащённых серой; температура их кристаллизации ~1150 и ~1100° С; среди продуктов их субсолидусных превращений преобладает сернистый – моноклинный пирротин Fe₇S₈ [9,10]

Поэтому, остальная часть залежи – её центр и её верхние части, помимо кристаллов Mss1, Mss2, сложены скоплениями кристаллов Iss1, Iss2, Iss3, Iss4, Iss5, недосыщенных серой; температура их кристаллизации от ~950 до ~760° С; среди продуктов их субсолидусных превращений наряду с халькопиритом, кубанитом, пентландитом, обильны минералы группы халькопирита, недосыщенные серой: талнахит $Cu_{18}Fe_{16}S_{32}$, моихукит $Cu_{18}Fe_{18}S_{32}$, пугоранит $Cu_{17}(Fe,Ni)_{18}S_{32}$ [2,8-10,13]. Размер кристаллов Iss3 в центре Главной Хараелахской залежи до 35 см, кристаллов Iss4 и Iss5 в прикровельной части залежи – до 15 см, размер кристаллов пентландита (продукта распада Iss4 - Iss5) – до 6 см. При кристаллизации высокотемпературных сульфидных твёрдых растворов благородные металлы были включены в эти твёрдые растворы: Rh, Ru, Os, Ir – в Mss, Pt, Pd, Au, Ag – в Iss [22]. Соответственно, существенно пирротиновые руды не должны содержать заметное количество минералов платины и палладия, а их там местами много. Это свидетельствует о флюидном перераспределении благородных металлов в процессе формирования их минералов.

Уникальная особенность Норильского рудного поля – наличие поздних легкоплавких (Т крист. ~ 550° С) эвтектик PbSss – Iss5 (или Iss4, Iss3) [8,15]. Сульфидные руды – эвтектические сростания, слагают гнёзда и секущие жилы нескольких поколений мощностью от первых см до 120 см и длиной от первых см до многих метров в различных частях залежей массивных сульфидных руд, в интрузивных породах и роговиках, которые эти руды окружают. Значительное число таких гнёзд и жил развиты в прикровельной части Главной Хараелахской залежи. Причина их появления – обилие калия и когерентного свинца в норильских рудно-магматических системах [8]. Продукты субсолидусных превращений PbSss – матрица галенита и тельца распада алтаита; судя по составу продуктов распада, температура распада отвечала 425-415° С [6]. Сульфидные руды – эвтектические сростания PbSss – Iss экстремально богаты Pd, Pt, Ag, Au и их минералами [8-15]. Во многих рудных столбах Главной Хараелахской залежи большая часть минералов Pd, Pt, Ag, Au находится в гнёздах и жилах эвтектических руд.

Норильские сульфидные расплавы были богаты флюидами (H_2O , K, Cl, F, CO, COS, CH_4 , P, Ba, Tl...). Каждое тело магматических сульфидов окружено ореолом флюидного воздействия из агрегатов титанистого биотита-флогопита, хлорапатита, фторапатита, амфиболов, ангидрита, магнетита и/или титаномагнетита, джерфишерита [2-4,7,8-15,22,24,25]. Масштаб ореола коррелирован с размером тел сульфидов, около крупных залежей ширина ореола превышает 10-15 м. Ареал распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных тел и совпадает с ореолами флюидного воздействия около сульфидных тел. Так, в 6 м выше кровли Главной Хараелахской залежи среди роговиков в гнезде биотита и амфибола без сульфидов нашли 8 мм кристалл сперрилита [9]. Для норильских руд типичны соотношения – Pd:Pt = 3 - 4,

Ag: Au = 30-40. Преобладающая часть Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами, часто микронного размера. Часть Pd и Ag рассеяна в пентландите.

Несмотря на то, что изучение минералов благородных металлов в норильских рудах продолжается многие десятилетия (их проводили О.Е. Звягинцев, Е.В. Искюль, И.Н. Масленицкий, Э.А. Кулагов, А.Д. Генкин, И.В. Муравьёва, В.Д. Бегизов, Т.Л. Евстигнеева, С.Ф. Служеникин, Л.Н. Вяльсов, В.А. Коваленкер, А.Ю. Барков, А.И. Пономаренко, Н.С. Рудашевский, Э.М. Спиридонов и иные исследователи), мы только начинаем понимать реально сложную и длительную историю их формирования. Большинство геологов считают минералы благородных металлов норильских руд продуктами магматической кристаллизации. Уже в 1968 г. А.Д. Генкин предположил, что эти минералы могли образоваться и в послемагматических процессах при участии флюидов. В дальнейшем многие исследователи доказали, что часть минералов благородных металлов – метакристаллы [1,2,5,7]. Наши наблюдения показали, что вся масса минералов благородных металлов норильских руд образована путем замещения магматических сульфидных руд и прилегающих пород; эти минералы замещали структуры распада галенит – алтаит, при этом галенит очищался от телец алтаита; с метасоматами этих минералов ассоциируют метасоматы алтаита и метасоматы хлорсодержащих сульфидов K–Tl: джерфшерита и талфенисита [8-15,25]. Эти факты – прямое доказательство флюидно-метасоматического, пневматолитового генезиса минералов Pd, Pt, Au, Ag в норильских сульфидных рудах. Пневматолитовые минералы Pd и Pt – интерметаллиды: станниды, висмутиды, куприды-станниды, плюмбиды и близкие теллуриды, арсениды, антимониды. С ними ассоциируют минералы Au-Cu и Au-Ag. В рудах присутствует когенит Fe₃C. Таким образом, пневматолитовые минералы благородных металлов возникли в резко восстановительных условиях, при крайне низкой активности сульфидной серы и кислорода. Вероятно, при участии карбониллов (и/или фуллеридов) платиновых металлов при T менее 415-410° C, это – T распада PbS_{ss} [6] и верхний предел устойчивости тетрааурикуприда, который ассоциирует со многими минералами палладия и платины в норильских рудах [14].

Э.М. Спиридонов [10,11] разделил историю образования пневматолитовых минералов благородных металлов норильских руд на 7 стадий. Нигглиит возник на 2 и 6 стадиях.

Нигглиит Главной Харелахской сульфидной залежи. Одни из распространённых типов пневматолитовых минералов благородных металлов 1 стадии – эквипланарные интерметаллиды палладия, твёрдые растворы на основе паоловита – $\sim (Pd,Pt,Au)_1(Sb,Sb,Bi,Te,Pb)_1$, предположительно кубические (рис. 1-2), реконструированы по продуктам распада твёрдого раствора. Пневматолитовые минералы благородных металлов 2 стадии представляют собой продукты субсолидусных превращений интерметаллидов 1 стадии – их распада, твердофазных

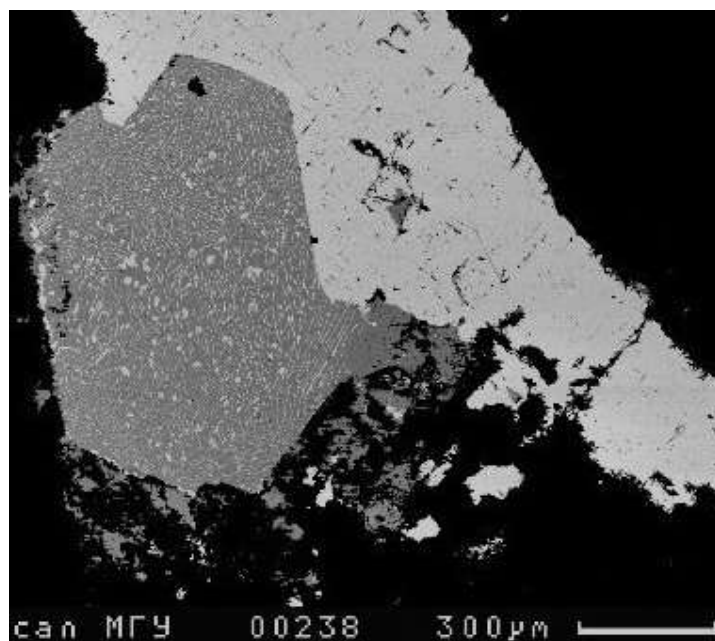


Рис. 1. Кубооктаэдрический метакристалл эквиаомного интерметаллида на основе паоловита на контакте галенита и талнахита. Эвтектические руды. Верхи Главной Хараелахской залежи. Гор. – 430 м. В отражённых электронах.

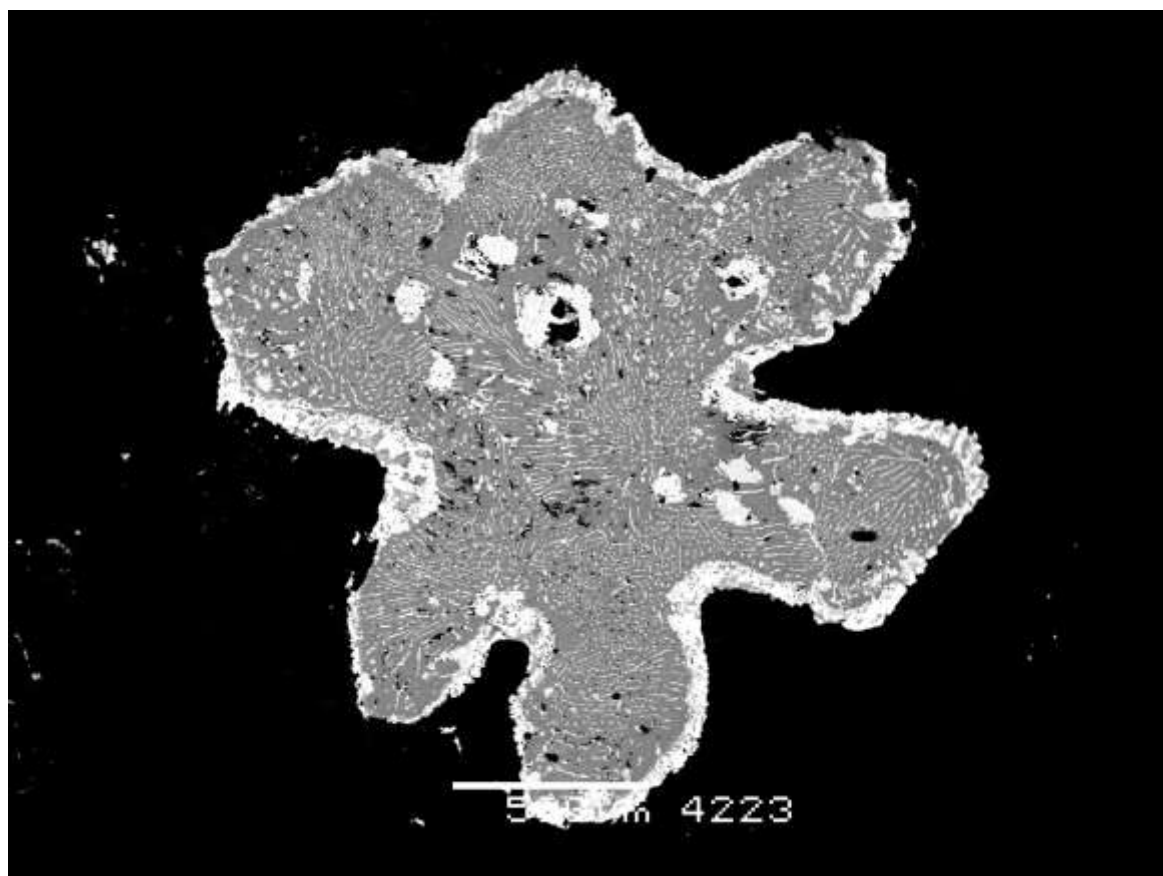


Рис. 2. Двойник монокристаллов эквиаомного интерметаллида 1 стадии в талнахите (чёрный). Монокристаллы превращены в агрегаты двойников полиморфного превращения, каждый со своим рисунком структур распада твёрдого раствора. Матрица – паоловит, тонкие ламелли-

геверсит и инсизваит (белые), более крупные тельца распада – нигглиит (светлый). В отражённых электронах. Эвтектические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 530 м.

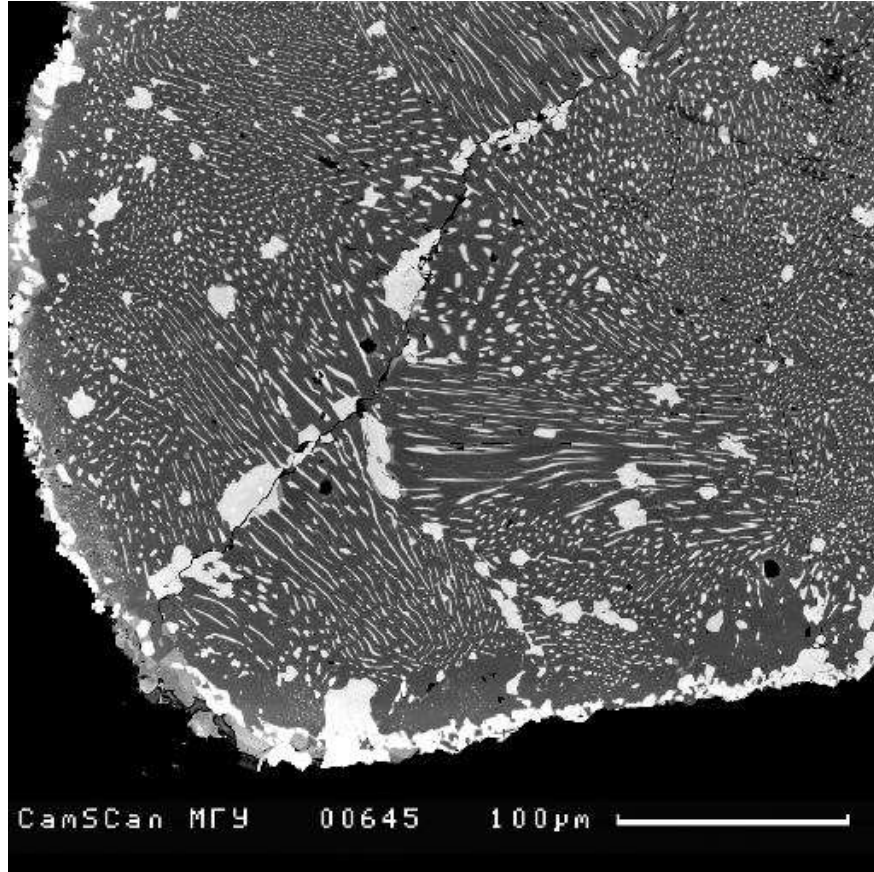


Рис. 3. Часть монокристалла эквиатомного интерметаллида 1 стадии в талнахите (чёрный). Монокристалл превращён в агрегат двойников полиморфного превращения, каждый со своим рисунком структур распада твёрдого раствора. Матрица – паоловит (тёмный), тонкие ламелли-геверсит и инсизваит (белые), более крупные тельца распада – нигглиит (светлый). В отражённых электронах. Эвтектические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м.

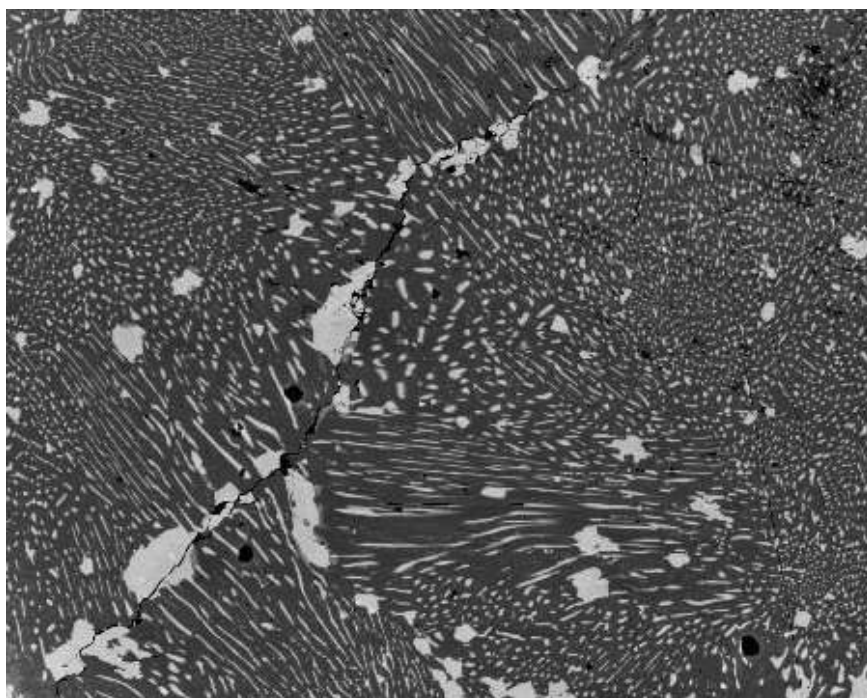


Рис. 4. Фрагмент рисунка 3.

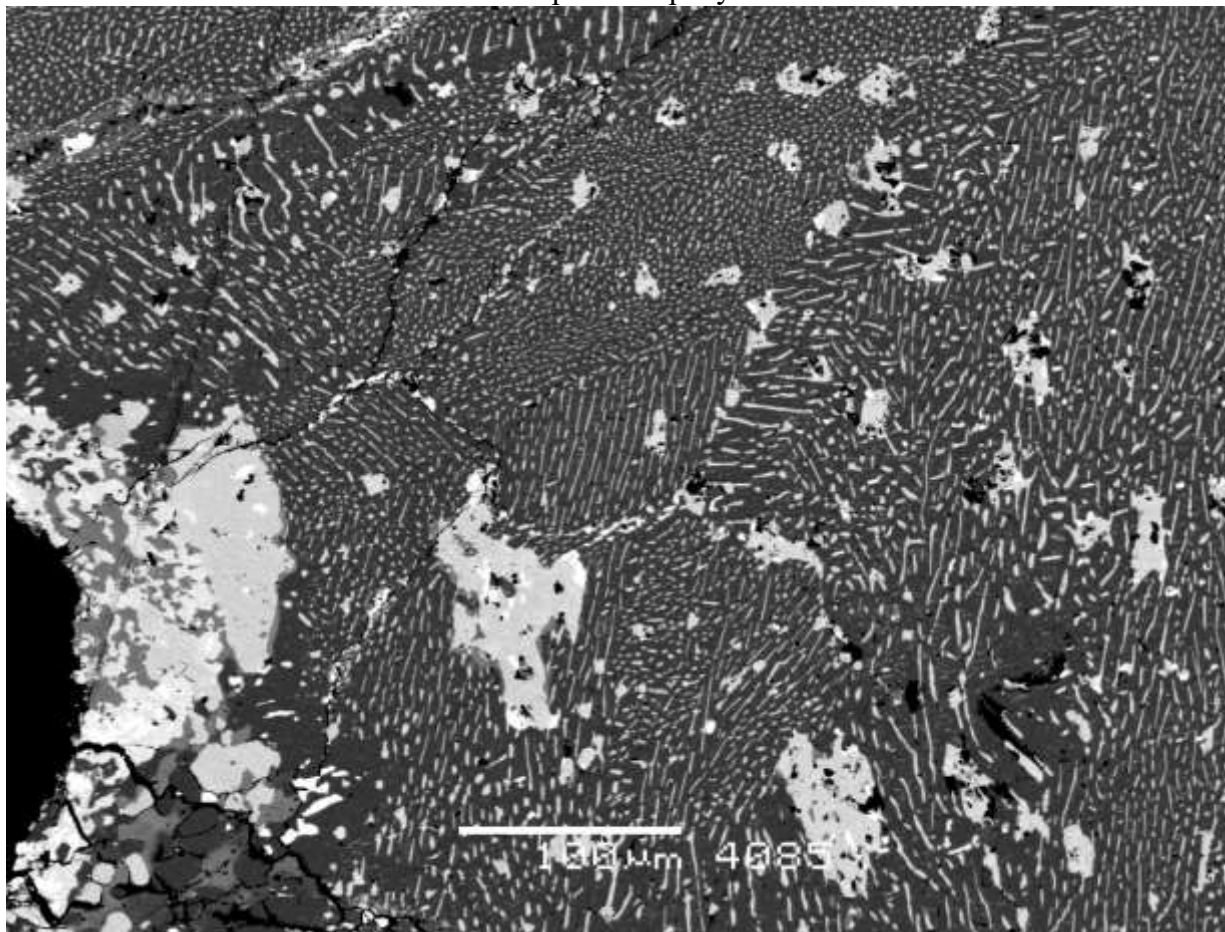


Рис. 5. Часть монокристалла эквиатомного интерметаллида 1 стадии в моихуките (чёрный слева). Монокристалл превращён в агрегат двойников полиморфного превращения, каждый со своим рисунком структур распада твёрдого раствора. Матрица – паоловит, тонкие ламелли-геверсит и инсизваит (белые), более крупные тельца распада – нигглиит (светло-серый). В отражённых электронах. Эвтектические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 330 м.

полиморфных превращений и перекристаллизации. При этом монокристаллы 1 стадии превратились в системы двойников полиморфных превращений (кубический → ромбический) и испытали распад. Следует отметить, что в каждом двойнике полиморфных превращений рисунок структур распада индивидуален (рис. 2-6). Матрица в структурах распада – ромбический паоловит, тонкие (близкие к пластинчатым) ламелли – Bi -геверсит и Sb -инсизваит, несколько более крупные неправильной формы тельца распада слагает Pd-Sb -нигглиит. Это – твёрдый раствор нигглиита (от 50 до 66, в среднем 59 мол. % PtSn) - штумпфлита (от 24 до 36, в среднем 29 мол. % PtSb) - садбериита (от 8 до 17, в среднем 12 мол. % PdSb). Обогащённый сурьмой и палладием нигглиит распространён на верхних горизонтах Главной Хараелахской залежи.

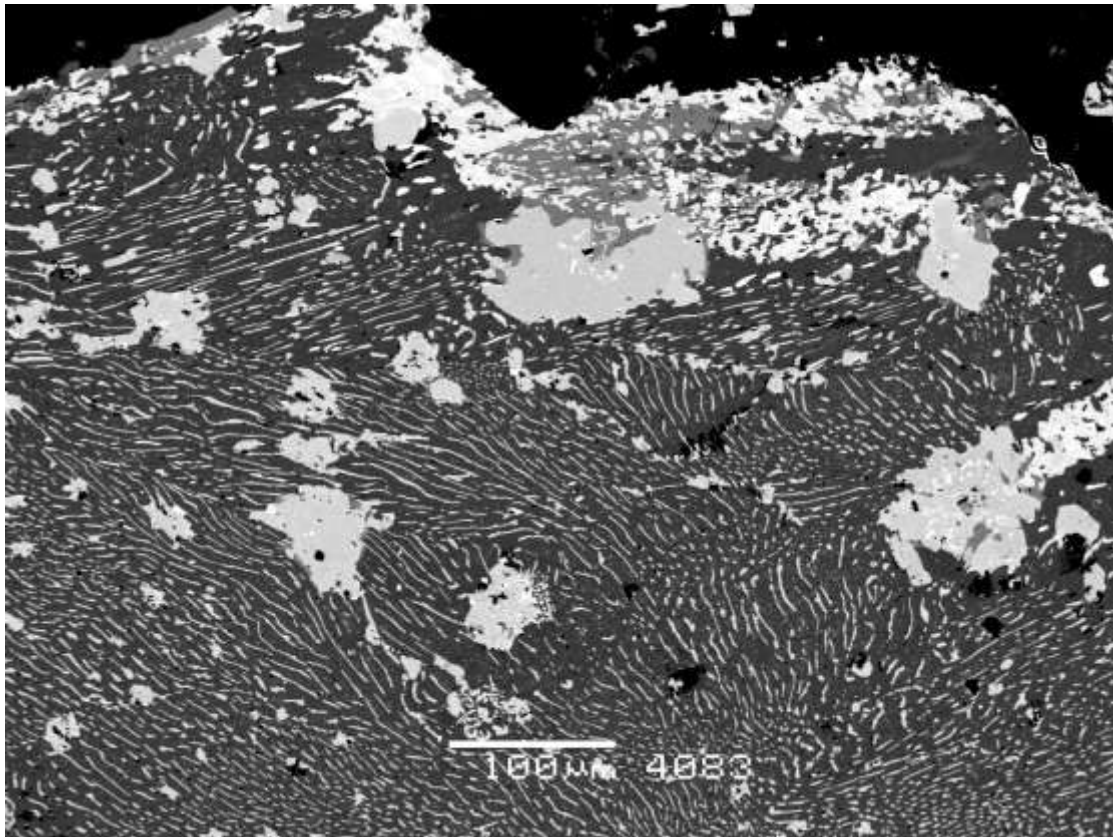


Рис. 6. Часть монокристалла экваторного интерметаллида 1 стадии в моихуките (чёрный слева). Монокристалл превращён в агрегат двойников полиморфного превращения, каждый со своим рисунком структур распада твёрдого раствора. Матрица – паоловит, тонкие ламелли – геверсит и инсизваит (белые), более крупные тельца распада – нигглиит (светло-серый). В отражённых электронах. Эвтектические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 330 м.

В дальнейшем произошла заметная перекристаллизация продуктов распада. Оформились пластинчатые кристаллы ромбического паоловита (для него характерна отчётливая цветная анизотропия). Промежутки между ними заполняют агрегаты небольших кристаллов геверсита – инсизваита и более крупные – нигглиита. Нигглиит в отражённом свете при 1 николе серый на фоне более ярких паоловита и дихалькогенидов платины – геверсита и инсизваита. Но в скрещенных николях нигглиит выделяется яркой цветной анизотропией в оранжевых и золотистых цветах (рис. 7-8). Этот нигглиит заметно беднее сурьмой и палладием, чем описанный выше: содержит от 61 до 92, в среднем 75 мол. % нигглиита PtSn, от 4 до 19, в среднем 12 мол. % штумпфлита PtSb, от 2 до 27, в среднем 13 мол. % садбериита PdSb. Полные химические анализы такого нигглиита даны в таблице. Как видно, этот нигглиит постоянно содержит немного родия, спорадически до 2-4 масс. % висмута, следы теллура, свинца, серебра, меди и никеля.

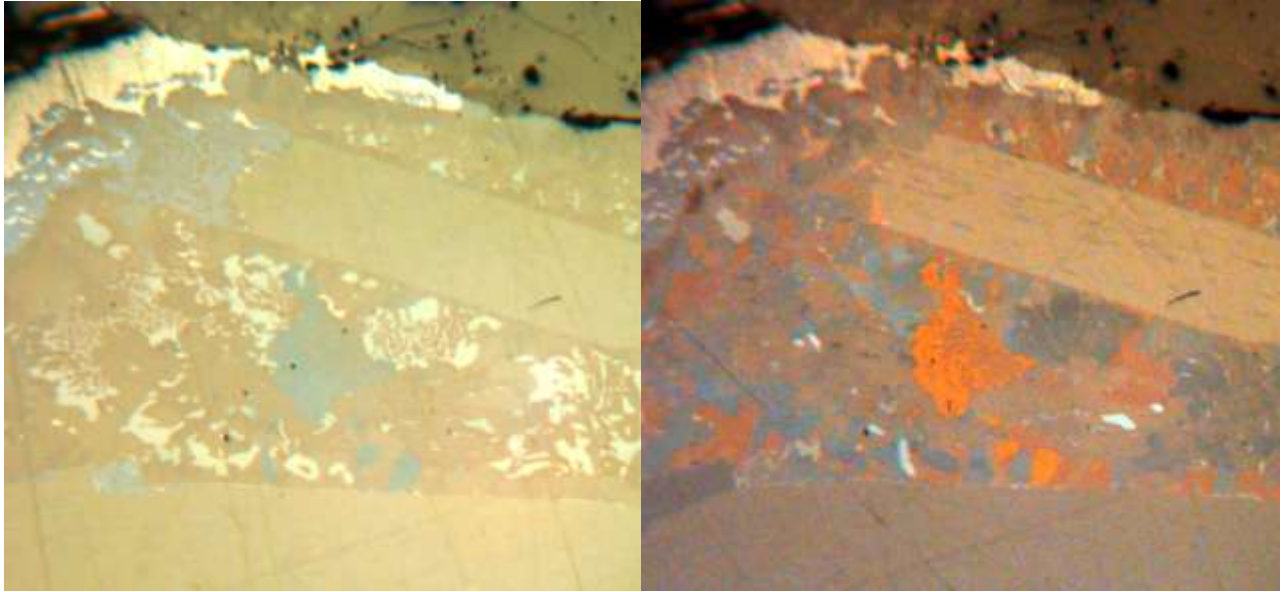


Рис. 7. Часть монокристалла экваторного интерметаллида 1 стадии в талнахите (наверху). Монокристалл превращён в агрегат крупных пластин паоловита, зернистые срастания геверсита и инсизвайта (золотистые при 1 николе) и нигглиита (серый при 1 николе и яркий оранжевый – в скрещенных). Яркая кайма – электрум. В отражённом свете, слева – при 1 николе, справа – николи х. Поле зрения 2 мм. Эвтектические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 330 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова и А.А. Машкиной.

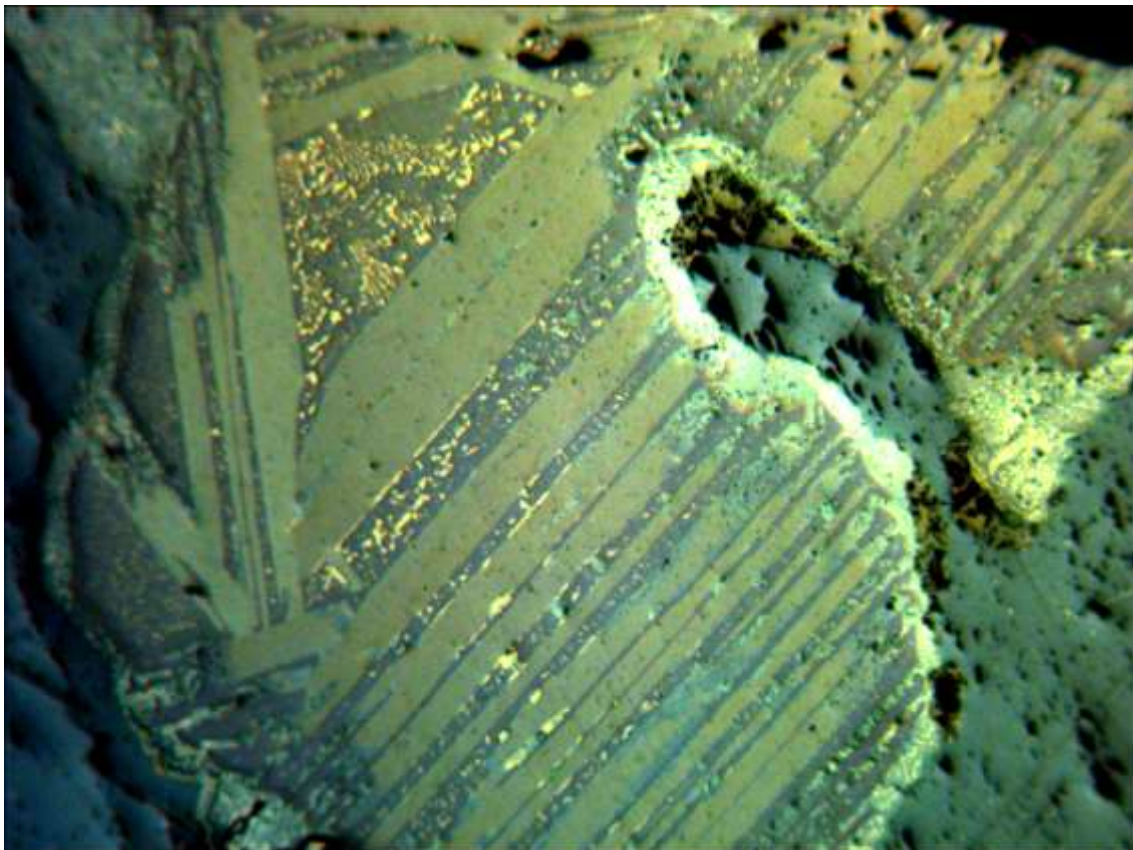


Рис. 8. Часть монокристалла экваторного интерметаллида 1 стадии в талнахите (наверху). Монокристалл превращён в агрегат крупных пластин паоловита, промежутки между которыми слагают зернистые срастания геверсита и инсизвайта и нигглиита (яркий золотистого цвета). В

отражённом свете, николи х. Поле зрения 3 мм. Эвтектические руды. Главная Хараелахская залежь. Гор. – 430 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова и А.А. Машкиной.

Таблица. Химический состав (масс. %) нигглиита телец распада в матрице паоловита в сульфидных рудах Главной Хараелахской залежи. Гор. – 430 м

Компо- Ненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt	60.52	57.06	57.76	56.95	57.53	53.94	54.44	49.16	48.72	50.54
Pd	0.77	2.31	1.69	3.09	2.70	4.00	4.52	8.76	9.70	6.82
Rh	0.11	0.20	0.21	0.15	0.09	0.09	0.30	0.21	0.16	0.05
Ag	0.00	0.32	0.36	0.29	0.00	0.00	0.00	0.32	0.26	0.00
Cu	0.00	0.00	0.03	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01
Ni	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01	0.05	0.02	0.06	0.00	0.05
Fe	0.00	0.00	0.09	0.00	0.01	0.00	0.09	0.01	0.14	0.07
Sn	34.02	34.33	31.50	31.70	29.27	25.70	25.05	24.07	22.82	21.11
Sb	3.15	4.55	5.31	6.41	8.36	11.36	12.61	14.99	16.51	15.74
Bi	0.27	0.00	1.79	0.75	0.54	1.46	1.90	1.62	1.62	4.06
Pb	0.17	0.00	0.00	0.04	0.17	0.81	0.48	0.14	0.49	0.65
Te	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
As	0.17	0.00	0.01	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00
Сумма	99.20	98.81	98.98	99.38	98.70	97.43	99.41	99.34	100.50	99.10
Число атомов в формуле										
Pt	0.98	0.91	0.92	0.90	0.98	0.87	0.85	0.75	0.73	0.79
Pd	0.02	0.07	0.05	0.09	0.08	0.12	0.13	0.25	0.27	0.20
Rh	0.00 ₅	0.01	0.01	0.01	-	0.00 ₅	0.01	0.01	-	-
Ag (Cu)	-	0.01	0.01	0.01	(0.01)	-	-	0.01	0.01	-
Fe (Ni)	-	-	0.01	-	-	(0.00 ₅)	0.01	-	0.01	0.01
Сумма	1.00 ₅	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.02	1.02	1.00
Sn	0.90	0.89	0.83	0.82	0.76	0.68	0.65	0.60	0.56	0.54
Sb	0.08	0.11	0.14	0.16	0.21	0.29	0.32	0.36	0.39	0.39
Bi	0.00 ₅	-	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.06
Pb (Te)	-	-	(0.01)	-	-	0.01	-	-	0.01	0.01
As	0.01	-	-	-	0.01		-	-	-	-
Сумма	0.99 ₅	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.98	0.98	1.00

Примечание. Электронный микрозонд Camebax, анал. И.М. Куликова.

Кроме того, в графических рудах Главной Хараелахской залежи установлен нигглиит второй генерации. Его небольшие кристаллы находятся в гнездах фрудита $PdBi_2$ в ассоциации с незональными геверситом, инсизваитом, поляритом, гесситом, электрумом, кюстелитом, -золотосодержащим серебром, Sb кабриитом [11]. Это пневматолитовые минералы 6 стадии, которые возникли среди деформированных агрегатов пневматолитовых минералов 1-5 стадий. В составе нигглиита II - от 94 до 100, в среднем 96 мол. % $PtSn$, от 0 до 6, в среднем 4 мол. % садбериита $PdSb$.

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

1. *Бегизов В.Д.* Минералы благородных металлов в рудах Талнахского месторождения. Дисс. канд. геол.-минерал. наук. М.: МГРИ. **1977**. 197 с.
2. *Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Вьяльсов Л.Н., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л.* Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, **1981**. 234 с.
3. *Годлевский М.Н.* Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат. **1959**. 89 с.
4. *Годлевский М.Н.* Магматические месторождения. В кн.: Генезис эндогенных месторождений. М.: Недра. **1968**. С. 7-83.
5. *Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д.* Платинометальная минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные // Геология медно-никелевых месторождений СССР. Л. [СПб.]: Наука, **1990**. С. 98–106.
6. *Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Павлов Е.Г.* О распаде природного твёрдого раствора в системе $PbS - PbTe$. В кн.: Упорядоченность и распад твердых растворов в минералах. М.: Наука. **1979**. С. 185-190.
7. *Кулагов Э.А.* Особенности минерального состава руд месторождения Норильск - I: Дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, **1968**. 239 с.
8. *Спиридонов Э.М.* Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. **2010**. Т. 51. С. 1356-1378.
9. *Спиридонов Э.М.* Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-**2019**. М.: Макс Пресс. 2019. С. 41-113.
10. *Спиридонов Э.М.* Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. **2022**. № 6. С. 95-116.
11. *Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Янаскурт В.О., Коротаева Н.Н.* Норильское рудное поле: прямое доказательство пневматолитового генезиса минералов палладия в сплошных сульфидных рудах // Новые идеи в науках о Земле. **2019**. Т. II. С. 380-383.
12. *Спиридонов Э.М., Голубев В.Н., Гриценко Ю.Д.* Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. **2010**. № 8. С. 867-875.
13. *Спиридонов Э.М., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Коротаева Н.Н., Серова А.А.* Норильское рудное поле: новая метаморфогенно-гидротермальная минеральная ассоциация – беспримесные

- звягинцевит и серебро, хиббингит, Mn хиббингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных пуроранитовых рудах // Вестник МГУ. Геология. **2022**. № 3. С. 70-82.
14. *Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М.* Платинисто-палладистый тетрааурикуприд и ассоциирующие минералы в рудах месторождения Норильск-I // Геология рудных месторождений. **2003**. Т. 45. № 3. С. 267-277.
15. *Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Коротаева Н.Н., Середина Е.В., Тушенцова И.Н., Беляков С.Н., Жуков Н.Н.* Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. **2015**. Т. 57. № 5. С. 447-476.
16. *Степанов В.К.* Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 162. **1981**. С. 13-19.
17. *Степанов В.К., Туровцев Д.М.* Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ, **1988**. Вып. 223. С. 86-94.
18. *Яковлев Ю.Н., Яковлева А.К., Нерадовский Ю.А.* Минералогия медно-никелевых месторождений Кольского полуострова. Л.: Наука. **1981**. 349 с.
19. *Cabri L.J., Harris D.C.* The new mineral insizwaite (PtBi₂) and new data on niggliite (PtSn) // Mineral. Mag. **1972**. Vol. 38. P. 794-808.
20. *Kinloch E.D., Peyerl W.* Platinum-group minerals in various rock types of the Merensky Reef: genetic implications // Econ. Geol. **1990**. Vol. 85. P. 537-555.
21. *Li C., Naldrett A.J.* Platinum-group minerals from the deep copper zone of the Strathcona deposit, Sudbury, Ontario // Canad. Mineral. **1993**. Vol. 31. P. 31-44.
22. *Naldrett A.J.* Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin - Heidelberg - N.Y. Springer: **2004**. 727 p.
23. *Scholtz D.L.* The magmatic nickeliferous ore deposits of East Griqualand and Pondoland // Publ. Univ. Pretoria. Ser. II: Nat. Sci. **1936**. Vol. 1. P. 81-210.
24. *Serova A.A., Spiridonov E.M.* Three type of apatite in Noril'sk sulfide ores // Geochemistry International. **2018**. Vol. 56. № 5. P. 474-483.
25. *Spiridonov E., Serova A., Belyakov S., Sereda E., Tuschentsova I.* Gold as indicator of the formation history of noble-metal minerals in Noril'sk sulfide ore. Northern Siberia, Russia // 13th Intern. Platinum Symp. Polokwane, South Africa. **2018**. P. 178-179.
26. *Spiridonov E.M., Serova A.A., Kulikova I. M., Korotaeva N.N., Zhukov N.N.* Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia // Canad. Mineral. **2016**. Vol. 54. P. 429-452.
27. *Springer G.* Chlorine-bearing and other uncommon minerals in the Strathcona deep copper zone, Sudbury district, Ontario // Canad. Mineral. **1989**. Vol. 27. P. 311-313.