

## ФЕРРОСКУТТЕРУДИТ<sup>1</sup>, НИКЕЛЬСКУТТЕРУДИТ И СКУТТЕРУДИТ НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Э.М. Спиридонов

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, mineral@geol.msu.ru

Ю.Д. Гриценко

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, mineral@geol.msu.ru

Впервые установленные в Норильском рудном поле триарсениды Co-Ni-Fe – скуттерудит, никельскуттерудит и ферроскуттерудит – развиты в метаморфогенно-гидротермальных апофиллит-ангидрит-доломит-кальцитовых жилах в ближайшей периферии залежей магматических сульфидных Co-Ni-Cu руд, захваченных эпигенетическим метаморфизмом в условиях пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций. Триарсениды Co-Ni-Fe выросли на агрегаты диарсенидов Co-Ni и неоднократно чередуются с ними в сложно-зональных сростаниях. Норильские скуттерудит и никельскуттерудит, как и скуттерудит и ферроскуттерудит, образуют непрерывные серии твёрдых растворов; в составе этих триарсенидов проявлен чёткий антагонизм Ni-Fe и сильные положительные связи Co-Fe и Co-S. В статье 6 таблиц, 12 рисунков, список литературы из 25 названий.

Для халькогенидов – сульфидов, сульфидарсенидов, арсенидов и иных соединений железа, кобальта и никеля характерны широкие пределы изоморфных замещений Fe-Co-Ni. Нередко это непрерывные серии твёрдых растворов – дисульфиды: пирит – ваэсит NiS<sub>2</sub> – каттерит CoS<sub>2</sub>, диарсениды: саффлорит CoAs<sub>2</sub> – раммельсбергит NiAs<sub>2</sub> – лёллинит FeAs<sub>2</sub> (Крутов, 1959; Шишкин, 1973; Воган, Крейг, 1981; Виноградова, 2002; Гриценко, Спиридонов, 2005а). К ним теперь относятся и триарсениды: скуттерудит CoAs<sub>3</sub> – никельскуттерудит NiAs<sub>3</sub> – ферроскуттерудит (Fe,Co)As<sub>3</sub>. Ранее был известен непрерывный ряд скуттерудит-никельскуттерудит (Годовиков, 1959; Roseboom, 1962; Radcliffe, 1968; Petruk *et al.*, 1971; Рудашевский и др., 1975, 1976; Воган, Крейг, 1981; Виноградова, 2002; Fanlo *et al.*, 2004).

Минералы группы скуттерудита MeAs<sub>3</sub> возникают при низкой активности сульфидной серы в гидротермальных растворах и представляют собой наиболее богатые мышьяком арсениды Co-Ni-Fe. Вероятно поэтому они образуются в карбонатных жилах, тогда как в гидротермально изменённых перидотитах, базитах и в метаморфизованных сульфидных Cu-Ni рудах обычно более бедные мышьяком маухерит Ni<sub>11</sub>As<sub>8</sub> и никелин NiAs.

Арсенидная минерализация развита в метаморфизованных сульфидных Ni-Cu рудах (Шнейдерхён, 1953; Яковлев и др., 1981; Нутто пен, 1999; Спиридонов и др., 2000; Гриценко, Спиридонов, 2005а,б, 2006). Минералы группы скуттерудита характерны для пятиметальной рудной формации и арсенидных

Ni-Co месторождений (Шнейдерхён, 1953; Крутов, 1959; Petruk *et al.*, 1971; Шишкин, 1973; Рудашевский и др., 1975, 1976; Fanlo *et al.*, 2004).

### Норильское рудное поле

Норильское рудное поле расположено в плитном чехле дорифейской Восточно-Сибирской платформы, в зоне краевых дислокаций. Магматические сульфидные Co-Ni-Cu руды сопряжены с интрузивами оливиновых габбро-долеритов трапшовой формации P<sub>2</sub> – T<sub>1</sub> (Годлевский, 1959; Додин и др., 1971; Генкин и др., 1981 и др.), их возраст 250±5 млн. лет. Магматические сульфиды слагают вкрапленность в придонных и в иных участках рудоносных Норильского, Талнахского и Таймырского интрузивов, сплошные залежи, жилы и импреньяции преимущественно в нижних эндоконтактных и прилегающих экзоконтактных зонах этих интрузивов. Месторождение Норильск-1 отрабатывается рудниками Заполярный, Медвежий ручей и Угольный Ручей; Талнахское – рудниками Маяк, Комсомольский, Скалистый; Таймырское (Октябрьское) – рудниками Октябрьский и Комсомольский.

Первичные руды сложены агрегатами минералов групп пирротина и халькопирита, кубанитом и пентландитом – продуктами твердофазовых превращений сульфидных твёрдых растворов Mss и Iss, кристаллизовавшихся из сульфидных расплавов, а также магнетитом. Состав первичных руд варьирует от пентландит-троилит-пирротино-

<sup>1</sup> Ферроскуттерудит как новый минерал утвержден Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной Минералогической Ассоциации 24 октября 2006 года. Голотип хранится в Минералогическом музее РАН им. А.Е. Ферсмана (№ 3440/1).

вого, пентландит-пирротин-кубанитового, пентландит-кубанит-галнахитового до пентландит-халькопиритового (Годлевский, 1959; Кулагов, 1968; Генкин и др., 1981 и др.). При послемагматической флюидной переработке произошла перекристаллизация магматических сульфидных руд, и возникли собственные минералы Pd, Pt, Au, Ag (Спиридонов и др., 2004).

Участки Восточно-Сибирской платформы, покрытые многокилометровой толщей базальтов и туфов базальтов и насыщенные интрузивами долеритов и габбро-долеритов трапповой формации, испытали существенное погружение. Трапповая формация и подтрапповые толщи были захвачены региональным метаморфизмом погружения: 1 стадия – в условиях цеолитовой фации (изотопный Rb/Sr возраст по апофиллиту 232 – 212 млн. лет); 2 стадия – в условиях от цеолитовой до пренит-пумпеллиитовой фаций (Rb/Sr возраст по апофиллиту и по метабазальтам 212 – 196 млн. лет); 3 стадия – в условиях от высоко- до низкотемпературной части цеолитовой фации (изотопный Rb/Sr возраст по апофиллиту и по метабазальтам 187 – 122 млн. лет) (Спиридонов и др., 2000). С этим метаморфизмом сопряжены медно-цеолитовая формация, месторождения исландского шпата и цеолитов, агатовая и датолитовая минерализация, проявления барита, целестина, сульфидов Zn, Pb, Cu, Ag (рис. 1).

Процессы низкоградного метаморфизма захватили также норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. Метагаббро-до-

лериты содержат пренит, пумпеллиит, эпидот, альбит, калишпат, титанит, минералы групп хлорита и серпентина, карбонаты, гидротранаты, актинолит, гронерит, седадонит, ильваит, разнообразные цеолиты, апофиллит, ксонотлит, пектолит, датолит, окенит, таумасит. Метаморфизованные сульфидные руды содержат пирит, Ni-пирит, валлериит, игольчатый кубанит, борнит, миллерит, хизлевудит, халькозин, макиनावит, гематит, ильваит, виоларит, годлевскит, кобальтпентландит, точилит, вьяльсовит, арсениды и антимониды никеля и кобальта и др. (Спиридонов и др., 2000). Типичные парагенезы метаруд: Ni-пирит + магнетит + валлериит, халькопирит + миллерит + захирит, борнит + миллерит, халькозин + хизлевудит. Агрегаты халькозина пересекают, обрастают и замещают агрегаты борнита.

### Антимонидно-арсенидная минерализация

Метаморфогенно-гидротермальная вкрапленная и жильная минерализация интенсивно проявлена в зонах трещиноватости, вблизи тектонических нарушений, особенно в зоне крупного Норильско-Хараелахского разлома, а также среди осадочных пород, богатых ангидритом и глинистыми минералами. Аرسениды Ni, Co и Fe и антимониды Ni в виде рассеянной вкрапленности развиты среди метаморфизованных сульфидных Co-Ni-Cu руд, слагают гнезда и вкрапленность в гидротермальных жилах (Годлевский, 1959; Кула-

Протектит	1 стадия	2 стадия	3 стадия	
	Цеолитовая фация T~200--300°C P~12 kb	Пренит-пумпеллиитовая фация T~390-950°C P~2-2.5 kb	Цеолитовая фация T~990--~1500°C P~2--0.5 kb	
Возраст Ma	Rb/Sr возраст, Ma (апофиллит)			
245-249	232-212	212-196	187-164	164-122
<b>Метаморфогенно-гидротермальная минерализация</b>				
<b>Метаморфизованные руды</b>				
-магнетит, пирит, рашпалит, гематит, пиллит -халькопирит, борнит, халькозин, валлериит, игольчатый кубанит -миллерит, хизлевудит, годлевскит, Co-интродуцит, Ni-пирит				
Цеолиты Агаты Аметист Датолит	Бет-гранат Датолит	Si-цеолитовая фация Ангидритовые ... жила с сульфидами Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Co		Цеолиты, агаты Малахитовый лист
			Вкрапленность в жилах с Ni, Co, Ag, Sn, Bi, Au, U	

Рис. 1. Последовательность и изотопный возраст процессов регионального низкоградного метаморфизма в Норильском регионе Восточно-Сибирской платформы.

гов, 1968; Додин и др., 1971; Изоитко, Вяльсов, 1973; Дистлер и др., 1975; Генкин и др., 1981; Гриценко, Спиридонов, 2005а,б, 2006). Триарсениды Co-Ni-Fe в Норильском рудном поле установлены нами впервые.

Хлорит-карбонатные и карбонатные (с пренитом и кварцем) и апофиллит-ангидрит-карбонатные жилы с антимонидами и арсенидами развиты на всех месторождениях рудного поля. Они многочисленны в Талнахском, в восточной части Октябрьского месторождения (рудник Комсомольский) и в южной части месторождения Норильск-1 (рудник Медвежий ручей). Мощность жил — 0.3–150 см, длина — 0.1–15 м. Кальцит в жилах с арсенидами содержит сингенетичные включения растворов NaCl и MgCl<sub>2</sub> солёностью 6.5–12.6 % экв. NaCl. Давление и температура, определённые по этим включениям, варьируют от 0.9–0.5 до 0.1 кбар и от 216 до 127°C. Параметры P и T арсенидной минерализации соответствуют параметрам формирования цеолитовой фации. Изотопный возраст апофиллита из жил с арсенидами — 164 млн. лет — отвечает поздней стадии регионального метаморфизма погружения (Спиридонов и др., 2000).

Кальцитовые, кальцит-доломитовые и апофиллит-ангидрит-карбонатные жилы с арсенидами и антимонидами Ni-Co развиты только в пределах залежей метаморфизованных сульфидных Co-Ni-Cu руд и в их ближайшем окружении, на удалении в первые метры. Кальцитовые и ангидрит-кальцитовые жилы с самородным мышьяком и лёллингитом развиты как среди залежей метаморфизованных сульфидных руд, так и за их пределами. Источником рудных элементов для гидротермальной Co-Ni-Sb-As минерализации служили метаморфизируемые сульфидные Co-Ni-Cu руды.

История формирования жильной антимонидно-арсенидной минерализации сложная. С учётом соотношений дробления, пересечения, обрастания и замещения выделено три стадии её формирования, включающие 12 минеральных комплексов.

Антимонидно-арсенидная минерализация первой стадии ассоциирует с борнитсодержащими рудами; её общий тренд от моноарсенида Ni к ди- и триарсенидам Ni и Co завершается образованием самородного мышьяка. Первая стадия включает девять минеральных комплексов: 1-й — кобальтин-герсдорфит-маухерит-никелин-Sb-никелиновый; 2-й — маухерит-герсдорфит-никелиновый с Sb-никелином; 3-й — брейтгауптит-маухеритовый; 4-й — лёллин-

гит-раммельсбергит-брейтгауптит-никелиновый; 5-й — кобальтин-брейтгауптит-маухерит-никелиновый; 6-й — маухерит-брейтгауптит-Co-никелиновый; 7-й — раммельсбергит-никелиновый; 8-й — ди-триарсенидный с сафлоритом; 9-й — с самородным мышьяком и лёллингитом.

Антимонидно-арсенидная минерализация второй стадии развита среди метаруд, нередко обогащённых халькозином; характерно наличие самородных серебра и висмута, ртутистого серебра, пирарагарита, клаусталита и иных селенидов, уранинита. Вторая стадия включает 10-й — никелин-брейтгауптит-раммельсбергит-лёллингитовый с маухеритом и 11-й — Sb-никелин-брейтгауптитовый минеральные комплексы.

Сульфоарсенидно-сульфоантимонидная минерализация третьей стадии (12-й минеральный комплекс) ассоциирует с пирит- и марказитсодержащими метарудами.

Антимонидно-арсенидная минерализация существенно никелевая, что коррелируется с составом норильских руд. Обогащённые Co арсениды возникали периодически после кристаллизации существенного количества минералов Ni.

В агрегатах арсенидов и антимонидов в карбонатных жилах проявлены зоны геометрического отбора, что свидетельствует о кристаллизации арсенидов из нормальных растворов в открытом пространстве.

### Изученный материал и методы исследования

Изучены более 100 образцов карбонатных жил с арсенидной минерализацией из всех месторождений Норильского рудного поля, собранные авторами во время полевых работ 1998-2004 гг. и предоставленные геологами Норильского ГМК им. А.П. Завенягина — Э.А. Кулаговым, С.Н. Беяковым, Е.В. Середой, А.П. Готовым, В.В. Бутенко. Химические анализы минералов выполнены с помощью электронного микрозонда Camebax в лаборатории микрозондового анализа ИМГРЭ РАН аналитиком И.М. Куликовой, и в лаборатории микрозондового анализа кафедры минералогии МГУ аналитиком Н.Н. Кононковой. Фотографии в режиме отражённых электронов получили в лаборатории микрозондового анализа кафедры петрологии МГУ аналитики Н.Н. Коротаева и Е.В. Гусева. Рентгенограммы скуттерудита и никельскуттерудита получены на дифрактометре ДРОН-4.5 в рентгеновской лаборатории кафедры неорганической химии МГУ. Флю-

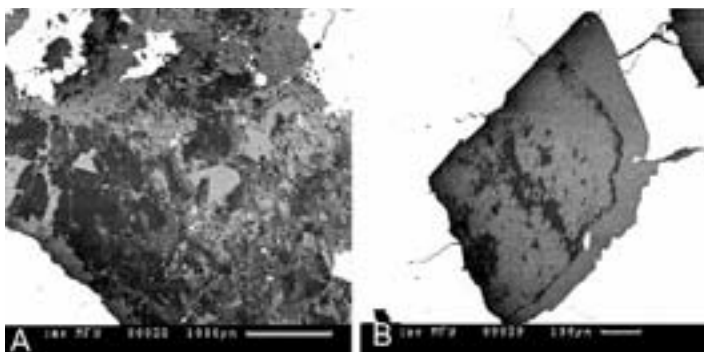


Рис. 2. Доломит, кальцит и ангидрит гидротермальных арсенидных жил.  
 А). Кристаллы доломита (тёмно-серый). Их оброс и частично заместил кальцит (серый). В промежутках – ксеноморфный ангидрит (светло-серый). Белые – арсениды.  
 В). Псевдоморфоза кальцита (светло-серый) по доломиту (тёмно-серый). Белый – сафлорит. Фотографии в отражённых электронах.

идные включения в кальците арсенидных жил изучили В.Ю. Прокофьев (ИГЕМ РАН) и Ю.Д. Гриценко.

В работе использована сквозная нумерация анализов минералов для всех образцов. Номера анализов в таблицах и на рисунках одни и те же.

### Скуттерудит, никельскуттерудит и ферроскуттерудит карбонатных жил

Триарсениды Co-Ni-Fe установлены только в одной из небольших систем ангидрит-кальцит-доломитовых жил у юго-восточного окончания Таймырского рудоносного интрузива (рудник Комсомольский). Здесь, в небольшой по мощности (около двух метров) зоне дробления, среди роговиков развита серия крутопадающих и наклонных карбонатных жил, мощностью до 7 см, с неравномерной вкрапленностью агрегатов арсенидов, а также светлоокрашенного сфалерита, магнетита, галенита. Размер выделений арсенидов от микроскопического до мелких гнёзд с поперечником до 21 мм. Размер выделений сульфидов и магнетита менее 2 мм. Голубоватый ангидрит слагает пластинчатые кристаллы, величи-

ной до 25 x 20 x 3 мм, и агрегаты пластин или изометричных зёрен в массе молочно-белого доломита и белого или розоватого кальцита. Совместно с ангидритом в отдельных участках жил развит фторгидроксилапофилит. Доломит  $\text{Ca}_{1,00-1,02}\text{Mg}_{0,76-0,96}\text{Fe}_{0,03-0,15}\text{Mn}_{0,00-0,07}(\text{CO}_3)_2$  слагает агрегаты кристаллов-ромбоздров, размером 0,3 – 2 мм. Его средний состав  $\text{Ca}_{1,01}\text{Mg}_{0,86}\text{Fe}_{0,10}\text{Mn}_{0,03}(\text{CO}_3)_2$ . Кальцит обрастает и замещает доломит вплоть до полных псевдоморфоз (рис. 2). Его средний состав  $\text{Ca}_{0,96}\text{Mn}_{0,02}\text{Fe}_{0,01}\text{Mg}_{0,01}(\text{CO}_3)$ .

Кальцит-доломитовые жилы с триарсенидами Co-Ni-Fe сложены главным образом агрегатами 8-го и в меньшей степени 7-го минеральных комплексов. В гнёздах, состоящих из ди- и триарсенидов, местами встречаются обломки никелина 7-го минерального комплекса, размером до 12 мм. Реликтовый никелин распределён крайне неравномерно. Никелин малосурьмянистый или без сурьмы содержит до 0,5 мас. % Co (табл. 1).

**Арсениды 1-го ритма.** Никелин интенсивно корродирован и оброс раммельсбергитом-1, который, в свою очередь, оброс и частью корродирован никельскуттерудитом-1 (рис. 3 – 6). Для раммельсбергита-1 характерно блочное строение (рис. 3 В,С). Границы

Рис. 3. Реликты никелина среди раммельсбергита-1, окружённого никельскуттерудитом-1.

А). Реликты никелина (розовый) среди раммельсбергита-1 (светлый), окружённого никельскуттерудитом-1 (более темный). Чёрные прожилки – кальцит и ангидрит. Полированный шлиф. Ширина поля зрения 0,8 мм.  
 В). Реликты никелина (серый, «пс», ан. 01, 02) среди раммельсбергита-1 различной сернистости (светло-серый до тёмно-серого, ан. 03, 04), на который нарост никельскуттерудит-1 (белый, ан. 10, 11). Чёрные прожилки – кальцит. Фотографии в отражённых электронах.  
 С). Фрагмент рис. 3В.

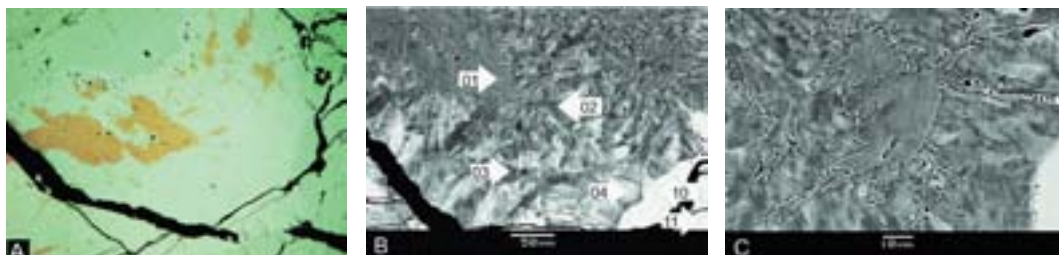


Таблица 1. Химический состав никелина 7-го минерального комплекса, раммельсбергита-1 и никельскуттерудита-1 8-го минерального комплекса карбонатных жил Норильского рудного поля

№ ан.	Элементы, мас. %							Формульные единицы в расчете на 2, 3 или 4 атома									
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Сумма
												кат.					анион.
<b>никелин (рис. 3)</b>																	
01	42.91	0.26	0.02	55.37	—	0.02	—	98.58	0.991	0.006	0.001	0.998	1.001	—	0.001	—	1.002
02	43.31	0.40	0.02	55.87	—	0.09	—	99.69	0.987	0.010	0.001	0.998	0.998	—	0.004	—	1.002
03	43.84	0.23	0.03	55.51	—	0.10	—	99.71	0.996	0.005	0.001	1.002	0.994	—	0.004	—	0.998
<b>раммельсбергит-1 (рис. 3)</b>																	
04	26.18	1.75	0.15	70.35	—	0.74	—	99.17	0.929	0.062	0.006	0.997	1.955	—	0.048	—	2.003
05	24.60	3.87	0.13	70.25	—	1.38	—	100.23	0.856	0.134	0.005	0.995	1.917	—	0.088	—	2.005
09	25.42	3.91	0.21	68.62	—	1.58	0.45	100.18	0.888	0.134	0.008	1.030	1.859	—	0.100	0.011	1.970
<b>раммельсбергит-2 (рис. 6)</b>																	
07	27.88	1.04	0.05	67.42	3.99	0.05	0.32	100.77	0.999	0.037	0.002	1.038	1.882	0.069	0.004	0.008	1.962
08	28.01	0.38	0.01	72.74	0.26	0.39	—	101.79	0.974	0.013	—	0.988	1.983	0.004	0.025	—	2.012
<b>никельскуттерудит-1 (рис. 3, 9 б)</b>																	
15	19.60	0.79	0.17	78.92	—	0.03	—	99.51	0.948	0.038	0.008	0.994	2.990	—	0.016	—	3.006
13	17.76	2.60	0.27	79.48	—	0.11	—	100.22	0.854	0.124	0.014	0.992	2.998	—	0.010	—	3.008
11	17.35	3.02	0.54	79.51	—	0.39	—	100.81	0.827	0.143	0.027	0.997	2.968	—	0.035	—	3.003
12	17.20	3.60	0.54	78.70	—	0.58	—	100.62	0.818	0.171	0.026	1.015	2.934	—	0.051	—	2.985
10	16.15	3.95	0.33	78.41	—	0.32	—	99.16	0.783	0.191	0.017	0.991	2.981	—	0.028	—	3.009
14	15.58	4.20	0.71	78.09	—	0.64	—	99.22	0.752	0.202	0.036	0.990	2.953	—	0.057	—	3.010

Примечание: — элемент не определялся или содержание элемента ниже чувствительности анализа. Номера в таблицах и на рисунках одни и те же

Таблица 2. Химический состав никельскуттерудита-2, скуттерудита-2 и Fe-скуттерудита-2

№ ан.	Элементы, мас. %							Формульные единицы в расчете на 2, 3 или 4 атома									
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Сумма
												кат.					анион.
<b>резко зональные кристаллы никельскуттерудит-2 – скуттерудит-2 (рис. 6, 7)</b>																	
17	19.19	2.09	0.40	78.59	—	0.10	0.33	100.70	0.917	0.099	0.020	1.037	2.943	—	0.009	0.012	2.963
18	18.69	1.99	0.54	80.31	—	0.09	0.13	101.76	0.876	0.093	0.027	0.996	2.989	—	0.008	0.005	3.002
19	17.89	2.62	0.83	79.88	—	0.09	0.12	101.43	0.844	0.123	0.041	1.007	2.980	—	0.008	0.004	2.992
20	15.71	4.77	0.82	79.65	0.08	0.32	0.12	101.46	0.741	0.223	0.040	1.004	2.963	0.002	0.028	0.004	2.996
16	11.24	6.94	1.56	77.95	0.07	0.38	0.41	98.56	0.605	0.332	0.079	1.016	2.934	0.002	0.033	0.015	2.984
21	9.87	9.17	1.75	76.23	0.14	1.21	—	98.37	0.476	0.442	0.089	1.007	2.884	0.002	0.107	—	2.993
22	7.45	12.06	1.97	78.70	0.31	1.40	—	101.89	0.347	0.560	0.096	1.003	2.871	0.007	0.119	—	2.997
23	5.92	12.95	1.88	77.00	0.14	1.89	—	99.78	0.281	0.610	0.093	0.984	2.851	0.002	0.163	—	3.016
<b>скуттерудит-2. Fe-скуттерудит-2 и никельскуттерудит-2. нарощие на резко зональные кристаллы</b>																	
<b>никельскуттерудита-2 – скуттерудита-2 (рис. 7, 9А)</b>																	
24	14.58	5.99	0.77	79.32	—	0.66	0.11	101.43	0.681	0.279	0.038	0.998	2.937	—	0.056	0.004	2.997
25	6.99	12.44	0.86	77.23	0.09	1.58	—	99.19	0.337	0.598	0.044	0.979	2.880	0.002	0.139	—	3.021
26	7.46	11.70	2.02	78.19	0.02	1.58	—	100.97	0.349	0.546	0.100	0.995	2.869	0.001	0.135	—	3.005
27	7.25	11.97	2.84	77.64	0.20	1.44	—	101.34	0.342	0.516	0.141	0.999	2.873	0.004	0.124	—	3.001
28	6.81	11.83	2.95	77.41	0.22	1.27	0.09	100.58	0.325	0.515	0.148	0.988	2.894	0.005	0.111	0.002	3.012
29	4.73	13.22	3.39	76.67	0.38	1.62	—	100.01	0.223	0.622	0.168	1.013	2.838	0.009	0.140	—	2.987
30	7.22	13.07	0.63	76.67	0.02	1.67	0.15	99.43	0.343	0.619	0.032	0.994	2.855	0.001	0.145	0.005	3.006



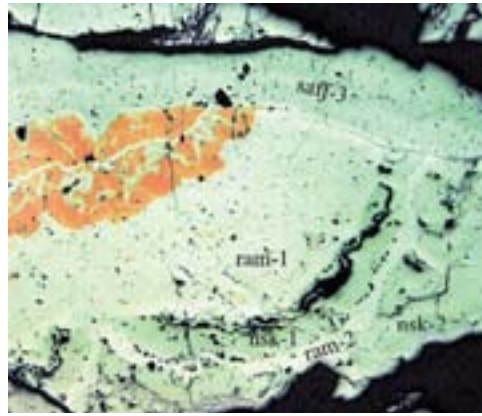
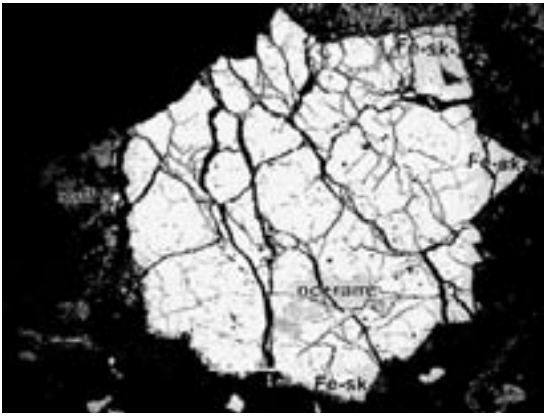


Рис. 4. Срастание кубических кристаллов никельскуттерудита-2 и скуттерудита (белый). Внешние зоны слагают Fe-скуттерудит-2 (светло-серый, «Fe-sk-2»); внутри срастания — реликты никелина в раммельсбергите (серое, «ps+ram»). Вокруг крупного срастания агрегат 3-го ритма: доломит (чёрное), Fe-сафлорит-3 (тёмно-серый, «saff-3»). Фотография в отражённых электронах.

Рис. 5. Взаимоотношения раммельсбергита, никельскуттерудита и сафлорита трёх поколений. Розовый — реликты никелина среди раммельсбергита-1 («ram-1») и никельскуттерудита-1 («nsk-1»). На никельскуттерудите-1 кайма раммельсбергита-2 («ram-2»), далее — зональные кристаллы никельскуттерудита-2 («nsk-2»). Диарсениды третьего ритма — сафлорит-3 и Со-раммельсбергит-3 («saff-3») выросли на агрегат раммельсбергита и никельскуттерудита первого и второго ритмов. Анилиф. Ширина поля зрения 15 мм.

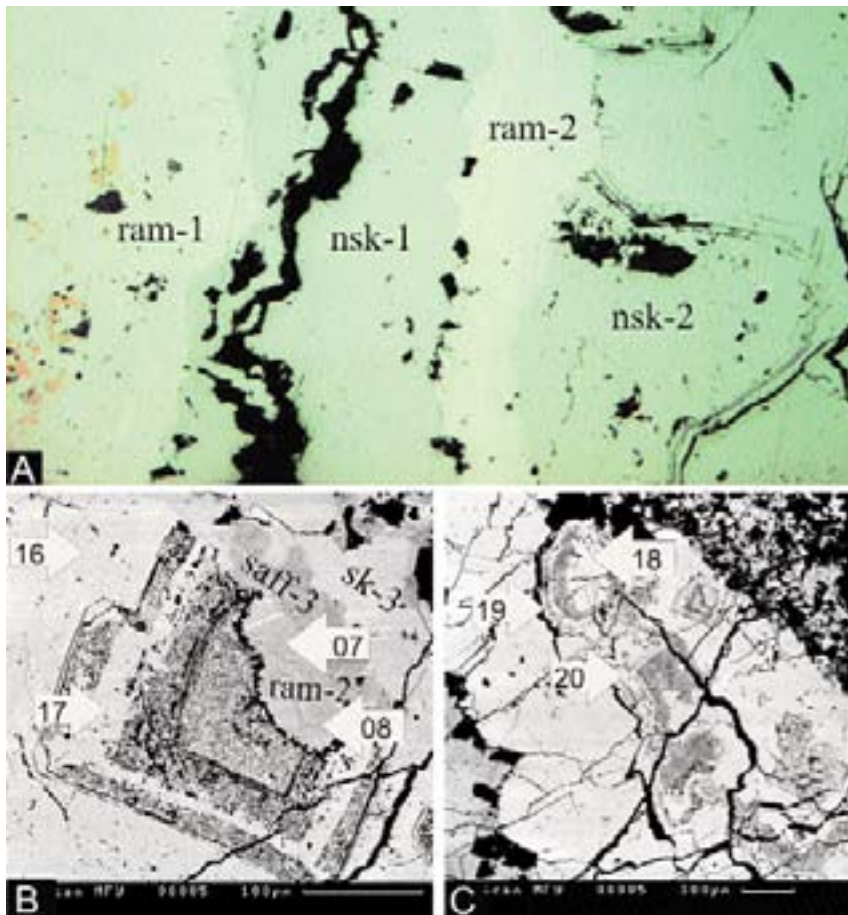


Рис. 6. Срастания раммельсбергита, никельскуттерудита и сафлорита трёх поколений.

А). На раммельсбергите-1 («ram-1») с реликтами никелина (розовый) вырос никельскуттерудит-1 («nsk-1»). На нём кайма раммельсбергита-2 («ram-2»), которая является подложкой для зональных кристаллов никельскуттерудита-2 («nsk-2»). Полированный шлиф. Ширина поля зрения 5 мм.

В). Зональный кристалл Со-никель-скуттерудита-2 (белый, ан. 16, 17) вырос на расщеплённый раммельсбергит-2 («ram-2», ан. 07, 08). Это фрагмент обломка арсенидов второго ритма, который обросли арсениды 3-го ритма — сафлорит («saff-3») и Ni-скуттерудит («sk-3»). Фотография в отражённых электронах.

С). Резко зональные кристаллы никельскуттерудита-2 (серо-белые, ан. 18-20). Фотография в отражённых электронах.

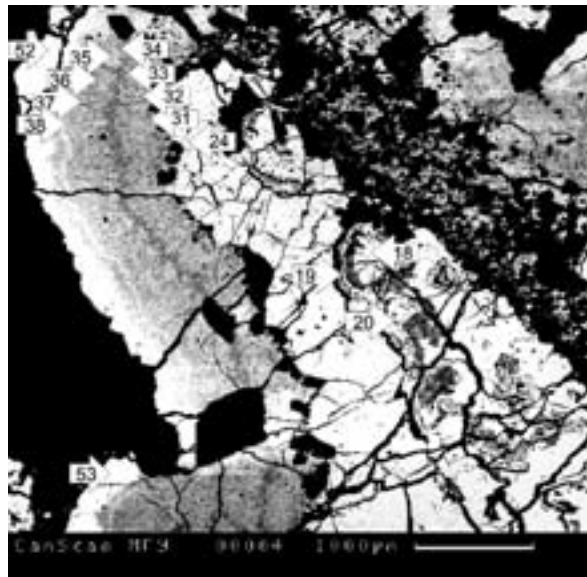
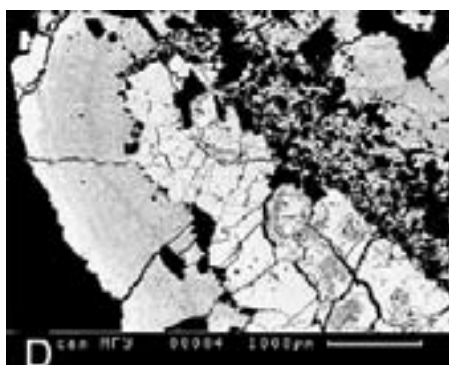
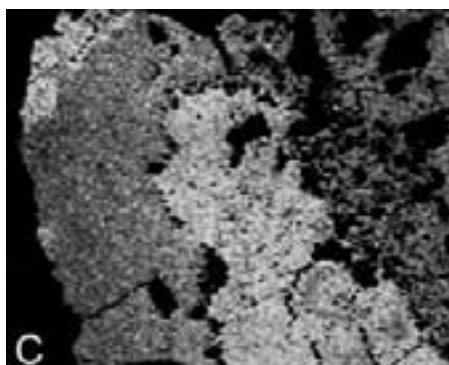
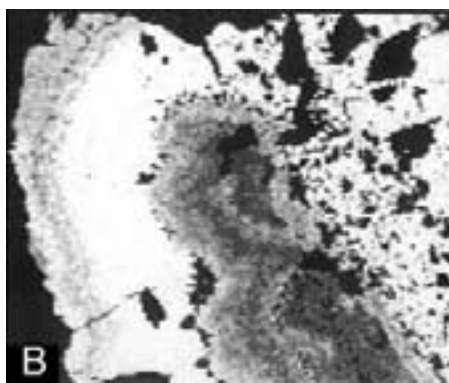
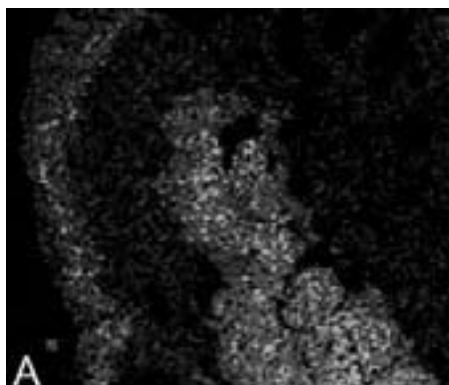
кристаллов никельскуттерудита-1 и доломита — индукционные (компромиссные) границы совместного роста. Эта минеральная ассоциация представляет первый ритм 8-го минерального комплекса.

Раммельсбергит-1 по составу умеренно низкосернистый, практически безжелезистый, содержит до 4 мас. % Co и до 0.5 % Se (табл. 1). Никельскуттерудит-1 низкокобальтистый и маложелезистый (табл. 1); для его состава характерны сильная отрицательная связь содержаний Ni-Co ( $r = -0.96$ ) и Ni-Fe ( $r = -0.80$ ), сильные положительные связи содержаний Co-Fe ( $r = +0.75$ ) и Co-S ( $r = +0.70$ ) ( $n = 14$ ).

**Арсениды 2-го ритма.** На агрегаты минералов первого ритма выросли сложнзональные агрегаты ди- и триарсенидов второго ритма. В их основании — расщеплённый раммельсбергит-2 без реликтов никелина (рис. 5, 6 а, б); на него выросли резко зональные кубические и кубооктаэдрические кристаллы никельскуттерудита-2, внешние зоны которых представлены Со-никельскуттерудитом-2 и скуттерудитом-2 (рис. 5-8, табл. 2), и далее относительно однородные выделения скуттерудита-2 с тонкими зонами Fe-скуттерудита-2 (рис. 9А, табл. 2). Встречаются обособленные кубооктаэдрические кристаллы триарсенидов второго ритма и их сроста-

*Рис. 7. Агрегат расщепленных кристаллов сафлорита-3 (ан. 31–36), доломита и Со-раммельсбергита-3 (ан. 37, 38) на агрегате резко зональных кристаллов никельскуттерудита — скуттерудита-2 (серо-белый, ан. 18–24). На диарсениды выросли Ni-скуттерудит-3 (белый, ан. 52, 53) и кальцит (чёрное). Фотография в отражённых электронах.*

*Рис. 8. Агрегат никельскуттерудита — скуттерудита-2, сафлорита-3 и Со-раммельсбергита-3, никельскуттерудита-3. Фотографии в характеристическом рентгеновском излучении Ni  $K_{\beta}$  (А); Co  $K_{\alpha}$  (В); As  $K_{\alpha}$  (С); в отражённых электронах (D).*





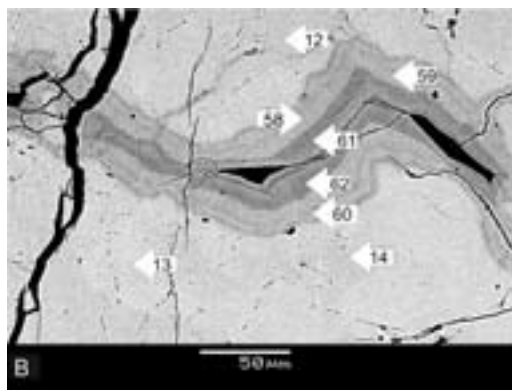
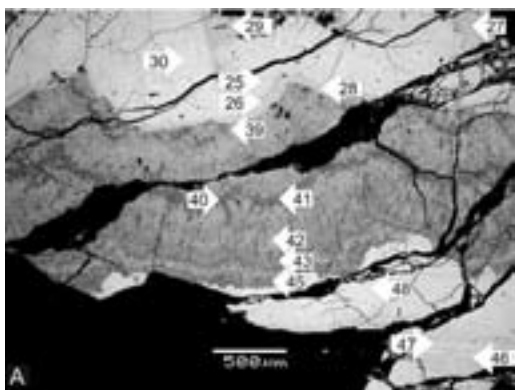
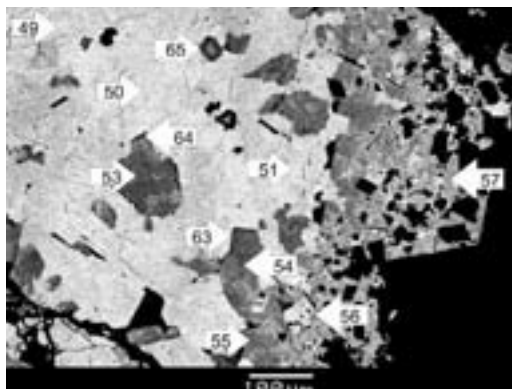


Рис. 9. Соотношения никельскуттерудита, Fe-скуттерудита, ферроскуттерудита и сафлорита. Фотографии в отражённых электронах.  
 А). На Fe-скуттерудит-2 (бело-серый, ан. 26–30) вырос агрегат ди- и триарсенидов 3-го ритма: сильно расщепленные, в различной степени сернистые Fe-сафлорит (светло-серый до темно-серого, ан. 39–42) и Со-раммельсбергит-3 (серый ан. 43–45), далее – никельскуттерудит-3 (бело-серый, ан. 46–48). Чёрное – кальцит и доломит.  
 В). Фрагмент прожилка Fe-скуттерудита (серый, ан. 58–60) и ферроскуттерудита (тёмно-серый, ан. 61, 62) в никельскуттерудите-1 (светло-серый, ан. 12–14). Кальцит – ветвящиеся прожилки (чёрный).

Рис. 10. Зональные кристаллы ферроскуттерудита-3 (тёмно-серый, ан. 63–65) – Fe-скуттерудита-3 (серый, ан. 53–57) среди никельскуттерудита-3 (белый, ан. 49–51). Чёрное – ромбоэдры доломита и прожилки кальцита. Фотография в отражённых электронах.



ния до 5 мм в поперечнике; во внешних зонах таких кристаллов зачастую преобладает Fe-скуттерудит-2 (рис. 4).

Раммельсбергит-2 по составу низкосурьмянистый, умеренно низкосурьмянистый и низкокобальтистый (табл. 1). Триарсениды резко зональных кристаллов 2-го ритма по составу образуют непрерывный ряд никельскуттерудит – скуттерудит, они практически не содержат Sb, количество Se – от следов до 0.4 мас. %. С ростом минала скуттерудита в этих минералах возрастают концентрации железа и серы (табл. 2). Для этих триарсенидов характерны сильные отрицательные связи содержаний Ni–Co ( $r = -0.98$ ) и Ni–Fe ( $r = -0.64$ ), положительные связи содержаний Co–Fe ( $r = +0.51$ ) и Co–S ( $r = +0.97$ ) ( $n = 36$ ). Более поздние триарсениды 2-го ритма по составу отвечают железисто-никелистому скуттерудиту, изредка кобальтистому никельскуттерудиту (табл. 2), они практически не содержат Sb и Se.

**Арсениды 3-го ритма.** Агрегаты ди- и триарсенидов с включениями ромбоэдров доломита и арсенидно-доломитовые агрегаты третьего ритма носили на кристаллы и агрегаты минералов первого и второго ритмов

(рис. 4–8, 9А), цементируют их обломки (рис. 7), образуют в них прожилки (рис. 9В), слагают обособленные выделения. Более ранние образования третьего ритма – агрегаты интенсивно расщеплённых Fe-сафлорита-3 – сернистого сафлорита-3 – Ni-сафлорита-3 – Со-раммельсбергита-3 (рис. 7-9А). На них вырос довольно однородный по составу никельскуттерудит-3 (рис. 9 А, табл. 3). В тех редких случаях, когда триарсениды образуют псевдоморфозы по более раннему сафлориту (рис. 7), их состав отвечает железисто-никелистому скуттерудиту (табл. 3, ан. 52, 53). В больших полях никельскуттерудита-3 развита масса мелких резко зональных кристаллов обогащённого железом Fe-скуттерудита-3 с оторочками ферроскуттерудита-3 (рис. 10). Такие же Fe-Со- и Со-Fe-триарсениды слагают прожилки среди минералов 1-го ритма (рис. 9В) и каймы обрастания на них.

Диарсениды 3-го ритма по составу образуют непрерывный ряд сафлорит-раммельсбергит. Они также (см. выше триарсениды 2-го ритма) бедны сурьмой и селеном. Сафлорит-3 постоянно обогащён железом, чаще вместе с серой. Раммельсбергит-3 обогащён кобальтом и беден железом



Таблица 3. Химический состав никельскуттерудита-3, Ni-скуттерудита-3 и Fe-скуттерудита-3

№ ан.	Элементы, мас. %					Формульные единицы в расчете на 2, 3 или 4 атома																											
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Сумма																
кат.																	анион.																
<b>никельскуттерудит-3, нарощий на сафлорит-3 (ан. 46–48, рис. 9 а), и обособленные выделения (ан. 49–51, рис. 10)</b>																																	
46	19,57	0,90	0,24	78,81	–	0,04	–	99,56	0,948	0,044	0,012	1,004	2,993	–	0,003	–	2,996																
47	19,27	1,40	0,33	78,92	–	0,14	–	100,06	0,928	0,067	0,016	1,011	2,977	–	0,012	–	2,989																
48	18,86	1,75	0,20	79,01	–	0,38	–	100,20	0,904	0,084	0,100	1,088	2,969	–	0,033	–	3,002																
49	17,28	2,96	0,34	78,54	–	0,29	–	99,41	0,836	0,143	0,017	0,996	2,978	–	0,026	–	3,004																
50	18,50	2,17	0,24	78,02	–	0,30	–	99,23	0,896	0,105	0,012	1,013	2,960	–	0,027	–	2,987																
51	15,98	3,15	1,29	78,81	–	–	–	99,23	0,778	0,152	0,066	0,996	3,004	–	–	–	3,004																
<b>Ni-скуттерудит-3, нарощий на Со-раммельсбергит-3 (рис. 7)</b>																																	
52	8,03	11,63	1,65	76,55	0,12	1,32	0,15	99,45	0,376	0,542	0,081	1,000	2,879	0,003	0,114	0,005	3,000																
53	7,21	11,39	2,37	77,84	0,34	1,48	0,15	100,77	0,336	0,529	0,116	0,981	2,880	0,008	0,126	0,005	3,019																
<b>Fe-скуттерудита-3 (рис. 10, 9В)</b>																																	
54	0,98	10,94	8,36	78,82	0,07	0,33	0,05	99,55	0,047	0,525	0,423	0,995	2,972	0,002	0,029	0,002	3,005																
55	0,28	11,56	8,22	78,48	0,09	0,71	–	99,34	0,018	0,552	0,415	0,985	2,951	0,002	0,062	–	3,015																
56	6,05	10,13	4,43	77,12	0,41	1,34	–	99,48	0,288	0,481	0,222	0,991	2,882	0,010	0,117	–	3,009																
57	2,16	13,66	5,10	76,89	0,08	0,97	0,13	98,99	0,104	0,653	0,257	1,014	2,894	0,002	0,085	0,005	2,986																
58	0,59	12,89	7,84	77,70	–	1,55	–	100,57	0,028	0,601	0,386	1,015	2,852	–	0,133	–	2,985																
59	0,89	14,22	6,04	77,77	–	1,44	–	100,36	0,042	0,667	0,299	1,008	2,869	–	0,124	–	2,993																
60	0,29	13,49	7,54	77,23	0,20	1,23	0,20	100,18	0,014	0,635	0,374	1,023	2,860	0,004	0,106	0,007	2,977																

Таблица 4. Химический состав Fe-сафлорита-3 и Со-раммельсбергита-3

№ ан.	Элементы, мас. %					Формульные единицы в расчете на 2, 3 или 4 атома																											
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Сумма																
кат.																	анион.																
<b>Разрез от контакта с триарсенидами 2-ой генерации (рис.7)</b>																																	
31	0,49	25,22	3,37	65,46	0,36	5,64	0,25	100,78	0,027	0,824	0,116	0,968	1,682	0,006	0,338	0,006	2,032																
32	1,11	23,12	3,95	67,02	0,32	4,21	0,13	99,86	0,055	0,775	0,139	0,969	1,764	0,005	0,259	0,003	2,031																
33	–	22,43	4,99	71,02	0,09	1,22	0,21	99,95	–	0,803	0,182	0,985	1,931	0,002	0,077	0,005	2,015																
34	–	24,79	4,48	64,82	0,30	5,73	0,08	100,21	–	0,821	0,156	0,977	1,671	0,005	0,345	0,002	2,023																
35	0,19	23,70	5,21	65,56	0,17	5,01	0,14	99,97	0,007	0,787	0,182	0,976	1,712	0,003	0,306	0,003	2,024																
36	3,55	21,07	3,64	67,00	0,11	4,29	0,14	99,80	0,123	0,707	0,129	0,959	1,770	0,002	0,265	0,003	2,041																
37	17,60	11,38	0,81	65,37	0,09	4,98	0,16	100,38	0,586	0,376	0,028	0,991	1,701	0,001	0,303	0,004	2,009																
38	17,49	12,52	0,61	67,95	0,10	3,98	0,10	102,74	0,576	0,410	0,021	1,007	1,750	0,002	0,240	0,002	1,993																
<b>Разрез от контакта с триарсенидами 2-ой генерации (рис.9А)</b>																																	
39	0,02	22,81	5,47	69,16	–	1,48	–	98,94	0,001	0,798	0,202	1,001	1,904	–	0,095	–	1,999																
40	0,06	23,22	6,48	65,17	–	4,17	–	99,10	0,002	0,782	0,230	1,014	1,728	–	0,258	–	1,986																
41	0,05	27,02	4,04	61,57	–	6,87	–	99,55	0,002	0,878	0,138	1,018	1,572	–	0,410	–	1,982																
42	8,73	17,16	2,56	67,55	–	3,28	–	99,28	0,293	0,573	0,157	1,023	1,776	–	0,201	–	1,977																
43	15,68	12,66	1,20	65,57	–	4,93	–	100,04	0,523	0,420	0,042	0,985	1,714	–	0,301	–	2,015																
44	16,64	11,71	0,61	65,32	–	4,10	–	98,38	0,566	0,397	0,038	1,001	1,743	–	0,256	–	1,999																
45	18,16	9,31	0,48	68,89	–	2,43	–	99,27	0,631	0,322	0,018	0,971	1,874	–	0,155	–	2,029																

Таблица 5. Химический состав ферроскуттерудита

№ ан.	Элементы, мас. %					Формульные единицы в расчете на 4 атома							
	Ni	Co	Fe	As	S	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	S	Сумма
61	0.05	8.70	12.95	79.43	1.31	102.44	0.002	0.398	0.626	1.026	2.864	0.110	2.974
62	0.01	7.94	12.63	77.56	1.43	99.57	0.001	0.374	0.628	1.003	2.843	0.124	2.967
63	0.05	8.04	12.38	77.09	1.39	98.95	0.002	0.381	0.619	1.002	2.877	0.121	2.998
64	0.10	8.82	10.38	77.96	1.24	98.50	0.005	0.423	0.525	0.953	2.938	0.109	3.047
65	0.05	8.38	12.09	78.01	1.34	99.87	0.002	0.394	0.600	0.996	2.888	0.116	3.004

Примечание: См. рисунки 9 и 10

(табл. 4). Для всего ряда в целом ( $n = 62$ ) характерны сильные отрицательные связи содержаний Ni-Co ( $r = -0.96$ ), Ni-Fe ( $r = -0.84$ ) и As-S ( $r = -0.98$ ), положительные связи Co-Fe ( $r = +0.66$ ), отсутствие связи содержаний Co-S.

Триарсениды 3-го ритма по составу обычно отвечают никельскуттерудиту, бедному Co, почти не содержащему Fe, Sb, S, Se (табл. 3, ан. 46–50). Для никельскуттерудита-3 характерны сильные отрицательные связи содержаний Ni-Co ( $r = -0.99$ ), Ni-Fe ( $r = -0.83$ ) и As-S ( $r = -0.91$ ), положительные связи Co-Fe ( $r = +0.76$ ) и Co-S ( $r = +0.93$ ) ( $n = 27$ ). Более редок богатый железом скуттерудит-3, низкосурьмянистый, умеренно обогащенный серой, от почти безникелистого до умеренно богатого никелем (табл. 3, ан. 52–60). Для железистого скуттерудита-3 характерны сильные отрицательные связи содержаний Ni-Co ( $r = -0.83$ ), Ni-Fe ( $r = -0.64$ ), Co-Fe ( $r = -0.72$ ) и As-S ( $r = -0.92$ ), сильная положительная связь Co-S ( $r = +0.81$ ) ( $n = 37$ ).

### Ферроскуттерудит карбонатных жил

Размер выделений ферроскуттерудита-3 от первых до 40 микрон. Рельеф высокий, близкий к скуттерудиту и сафлориту, выше, чем у никельскуттерудита. Твёрдость по микровдавливанию  $VHN_{50} = 700 - 1050$  кг/мм<sup>2</sup> ( $n = 4$ ). В отражённом свете высокоотражающий (58–54%), белый, изотропен. Спектр отражения близок к скуттерудиту, отражение несколько более высокое:  $R, \%$  (в воздухе, эталон – аттестованный WTiC) – 57.2 (400 нм); 57.6 (420); 58.0 (440); 58.2 (460); 58.2 (470 нм) (СОМ); 58.2 (480); 58.0 (500); 57.6 (520); 57.3 (540); 57.2 (546 нм) (СОМ); 56.9 (560); 56.4 (580); 56.2 (589 нм) (СОМ); 56.0 (600); 55.5 (620); 55.2 (640); 54.9 (650 нм) (СОМ); 54.7 (660); 54.3 (680); 53.8 (700 нм).

Ферроскуттерудит-3 содержит лишь следы Ni, Sb, Se (табл. 5). Среднему составу минерала ( $n = 5$ ) отвечает формула  $(Fe_{0.600}Co_{0.394}Ni_{0.002})_{0.996}(As_{2.888}S_{0.116})_{3.004}$ , что близко к

Таблица 6. Рентгенограмма ферроскуттерудита

$I_{изм.}$	$d_{изм.}, \text{Å}$	$d_{выч.}, \text{Å}$	$hkl$
3	5.8	5.77	110
3	4.10	4.085	200
4	3.34	3.335	211
10	2.585	2.584	310
9	2.182	2.184	321
4	1.928	1.926	411
7	1.829	1.827	420
3	1.744	1.742	332
5	1.667	1.6677	422
7	1.602	1.6023	510
6	1.402	1.4011	530
3	1.364	1.3617	600
2	1.291	1.2918	620

Примечание: Камера Дебая-Шерера,  $D 57.3$  мм,  $CuK\alpha$ .

$(Fe_{0.6}Co_{0.4})_1As_3$ .

Дифракционные данные кубических триарсенидов никельскуттерудита, скуттерудита, и ферроскуттерудита очень похожи. Индексирование рентгенограммы ферроскуттерудита (табл. 6) проведено по аналогии со скуттерудитом. Ферроскуттерудит кубический, пространственная группа  $Im\bar{3}m$ ,  $a = 8,17(1)$  Å,  $V = 545.34(3)$  Å<sup>3</sup>,  $Z = 8$ .

### Выводы

1. Ди-триарсенидный минеральный комплекс антимонидно-арсенидной минерализации Норильского рудного поля возник при многократных тектонических подвижках. Более поздние минеральные образования этого комплекса образуют и замещают более ранние, развиты среди них в виде прожилков и цемента брекчий. Для ди-триарсенидного минерального комплекса характерен доломит, для минеральных комплексов с моно- и диарсенидами – кальцит.

2. В каждом из трёх ритмов ди-триарсе-

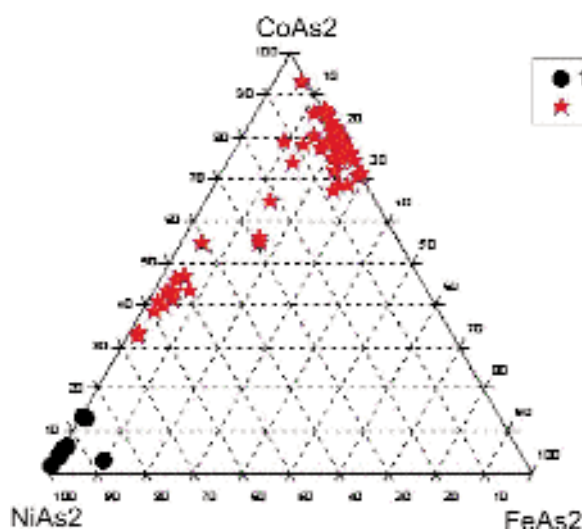


Рис. 11. Состав диарсенидов 8-й минеральной ассоциации карбонатных жил Норильского рудного поля; 1+2 – раммельсбергит-1 и раммельсбергит-2; 3 – Co-раммельсбергит-3 и Fe-саффорит-3.

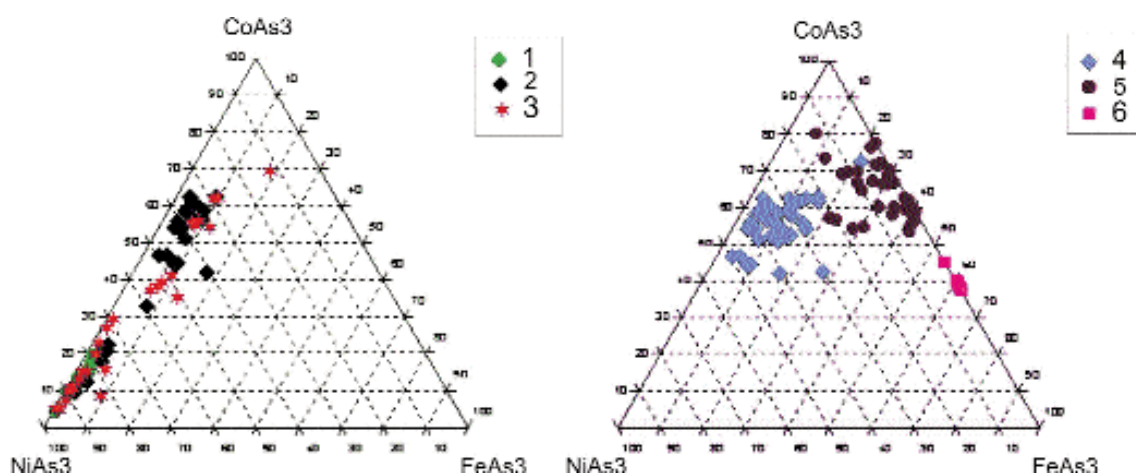


Рис. 12. Состав триарсенидов Норильского рудного поля;

1 – никельскуттерудит-1; 2 – зональные скуттерудит-никельскуттерудит-2; 3 – скуттерудит-никельскуттерудит-3; 4 – Fe-Ni-скуттерудит-2; 5 – Fe-скуттерудит-3; 6 – ферроскуттерудит-3

нидного минерального комплекса более ранние образования – диарсениды Ni-Co, более поздние – триарсениды Ni-Co-Fe. Диарсениды образуют непрерывную серию твёрдых растворов раммельсбергит-саффорит (рис. 11).

3. В каждом из трёх ритмов ди-триарсенидного минерального комплекса более ранним является никельскуттерудит, более поздними – скуттерудит и Fe-скуттерудит. Наиболее дифференцирован состав триарсенидов третьего ритма, среди никельскуттерудита здесь развиты кристаллы обогащённого железом скуттерудита с оторочками ферроскуттерудита.

4. По составу норильские триарсениды образуют два обособленных ряда: скуттеру-

дит-никельскуттерудит и скуттерудит-ферроскуттерудит (рис. 12). В составе проявлен чёткий антагонизм Ni–Fe и сильные положительные связи содержаний Co–Fe и Co–S.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 04-05-64162; 07-05-00057).

## Литература

Виноградова Р.А. Минералы никеля и кобальта (новые данные, краткий обзор) //Вестн. МГУ. Сер. геол. **2002.** № 4. С. 37–45.

Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных мине-

- ралов. М.: Мир. **1981**. 575 с.
- Генкин А.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука. **1981**. 234 с.
- Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат. **1959**. 89 с.
- Гоговилов А.А. О зависимости параметра решётки минералов группы скуттерудита от химического состава //Тр. Мин. музея АН СССР им. А.Е.Ферсмана. **1959**. Вып. 10. С. 57–73.
- Гриценко Ю.Д., Спиридонов Э.М. Минералы непрерывных рядов раммельсбергит – лёллингит и раммельсбергит – саффлорит в метаморфогенно-гидротермальных антимонидно-арсенидно-карбонатных жилах Норильского рудного поля //Зап. ВМО. **2005а**. Ч. 134. Вып. 1. С. 53–68.
- Гриценко Ю.Д., Спиридонов Э.М. Минералы ряда никелин – брейтгауптит в рудах месторождений Норильского рудного поля //Новые данные о минералах. **2005б**. Вып. 40. С. 51–64.
- Гриценко Ю.Д., Спиридонов Э.М. Сульфоарсениды и сульфоантимониды никеля, кобальта, железа, кротовит и арсенопирит метаморфогенно-гидротермальных жил Норильского рудного поля // Новые данные о минералах. **2006**. Вып. 41. С. 46–55.
- Дистлер В.В., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Балбин А.С. Арсениды, сульфоарсениды никеля, кобальта и железа Талнахского рудного поля. // В кн.: Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. Л.: Наука, **1975**. С. 61–74.
- Додин Д.А., Батуев Б.Н., Митенков Г.А., Изоитко В.М. Атлас пород и руд Норильских медно-никелевых месторождений. Л.: Недра. **1971**. 560 с.
- Изоитко В.М., Вяльсов Л.Н. Об ассоциации арсенидов и антимонидов никеля в рудах Талнахского месторождения. //В кн.: Минералы и парагенезисы минералов рудных месторождений. Л.: Наука, **1973**. С. 31–38.
- Крутов Г.А. Месторождения кобальта. М.: Госгеолтехиздат. **1959**. 232 с.
- Кулагов Э.А. Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-1. Дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, **1968**. 239 с.
- Рудашевский Н.С., Григорьев Д.П. Микронзондовый анализ тетраарсенидов кобальта и никеля и номенклатура скуттерудитов //Зап. ВМО. **1976**. Ч. 105. Вып. 3. С.265–281.
- Рудашевский Н.С., Шишкин Н.Н., Бутько И.А. Крайний никелевый член изоморфного ряда  $CoAs_3-NiAs_3$  //Зап. ВМО. **1975**. Ч. 104. Вып. 2. С. 209–216.
- Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Ассоциации минералов палладия, платины и золота в рудах Норильского месторождения //Геология рудных месторождений. **2004**. Т. 46. № 2. С. 175–192.
- Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Симонов О.Н., Кулагов Э.А., Сергеев Е.В., Степанов В.К. Метавулканиды пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: МГУ. **2000**. 212 с.
- Шишкин Н.Н. Кобальт в рудах месторождений СССР. М.: Недра. **1973**. 273 с.
- Шнейдерхён Г. Рудные месторождения. М.: ИЛ. **1953**. 501 с.
- Яковлев Ю.Н., Яковлева А.К., Нераговский Ю.Н. Минералогия сульфидных медно-никелевых месторождений Кольского полуострова. Л.: Наука. **1981**. 352 с.
- Fanlo I., Subias I., Gervilla F., Paniagua A., Garcia B. The composition of Co-Ni-Fe sulfarsenides, diarsenides and triarsenides from the San Juan de Plan deposit, central Pyrenees, Spain //Canad. Mineral. **2004**. Vol. 42. P. 1221–1240.
- Hytönen K. Suomen Mineraalit. Geologian Tutkimuskeskus. Erillisjulkaisien: **1999**. 399 s.
- Petruk W., Harris D.C., Stewart J.M. Characteristics of the arsenides, sulpharsenides, and antimonides //Canad. Mineral. **1971**. Vol. 11. P. 150–186.
- Radcliffe D. Structural formula and compositions of skutterudite //Canad. Mineral. **1968**. Vol. 9. P. 559–563.
- Roseboom E.H. Skutterudites  $(Co, Ni, Fe)As_{3-x}$ : compositions and cell dimensions //Amer.