

УДК 549.322 (571.511)

МИНЕРАЛЫ РЯДА НИКЕЛИН-БРЕЙТГАУПТИТ МЕТАМОРФОГЕННО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ЖИЛ НОРИЛЬСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Ю.А. Гриценко, Э.М. Спиридонов

Московский государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, mineral@geol.msu.ru

Антимонидно-арсенидная минерализация Норильского рудного поля, которую предшествующие исследователи рассматривали как производную трапповой формации P₂-T₁, сопряжена с послетрапповым региональным метаморфизмом в условиях цеолитовой фации с возрастом 164–122 млн. лет. Антимонидно-арсенидная минерализация моложе трапповой формации более чем на 80 млн. лет. Арсениды и антимониды Ni (Co, Fe) развиты среди метаморфизованных Ni-Cu сульфидных руд и в ближней периферии их залежей, главным образом в составе кальцитовых и ангидрит-кальцитовых жил. Параметры формирования жил: P=0.9–0.1 кбар, T=216–127°C, растворы NaCl-MgCl₂ невысокой солености (0.2–1.4% экв. NaCl). История формирования метаморфогенно-гидротермальных образований сложная. Проявлены три цикла антимонидно-арсенидной минерализации. Первый цикл включает девять минеральных комплексов существенно арсенидного состава; характерно наличие никелина с высоким содержанием Co, диарсенидов и триарсенидов Ni-Co. Второй цикл включает два минеральных комплекса существенно антимонидного состава, характерно наличие минералов серебра. Третий цикл представлен сульфоарсенидно-сульфоантимонидным минеральным комплексом.

Значительную часть антимонидно-арсенидной минерализации образуют минералы непрерывного ряда никелин-брейтгауптит. Наиболее распространены крайние члены ряда — никелин и брейтгауптит, довольно широко — сурьмянистый никелин. Норильский никелин содержит до 12 мас.% Co, до 3 мас.% Fe и S. Брейтгауптит беден Co, Fe, S, Se. В концентратах никелина Pd, Pt, Au не обнаружены. В агрегатах арсенидов и антимонидов развиты зоны геометрического отбора, что свидетельствует о кристаллизации арсе-

нидов и антимонидов из нормальных растворов в открытом пространстве.

В статье 9 таблиц, 9 рисунков, список литературы из 24 названий

Введение

Арсенидная минерализация не характерна для магматических Ni-Cu руд. Такая минерализация развита в метаморфизованных их типах (Шнейдерхен, 1953; Яковлев и др., 1981; Leblanc *et al.*, 1990; Hynnen, 1999).

Никелин NiAs и брейтгауптит NiSb распространены в различных типах гидротермальных месторождений, особо характерны для месторождений пятиэлементной формации и близких к ним никель-кобальт-арсенидных (Крутов, 1959; Рамдор, 1962; Дымков, 1985; Чвилева и др., 1988). В этих месторождениях обычно преобладает никелин (Бу-Аззер, Марокко; Хову-Аксы, Тува и др.). Значительно реже преобладает брейтгауптит (Виттихен, Германия). В единичных месторождениях пятиэлементной формации (Белореченское, Северный Кавказ) широко развиты и промежуточные члены изоморфного ряда никелин — брейтгауптит (Пеков, 1993). Наши наблюдения показали, что и в Норильском рудном поле распространены минералы в пределах всего ряда никелин-брейтгауптит.

Ni-Co-арсенидная минерализация в норильских сульфидных Cu-Ni рудах известна около 50 лет (Годлевский, 1959 и др.). Маухе-

рит точно диагностировал Э.А. Кулагов (Кулагов, 1968; Кулагов, Евстигнеева, 1971); никелин, герсдорфит и брейтгауптит — Л.Н. Вяльсов и В.М. Изюитко (Изюитко, Вяльсов, 1973; Генкин и др., 1981). В.В. Дистлер с соавторами охарактеризовали никелин, маухерит, сафлорит, леллингит, раммельсбергит, герсдорфит, брейтгауптит и самородный мышьяк (Дистлер и др., 1975). А.И. Пономаренко обнаружил палладийсодержащий брейтгауптит среди гнезд первичных Pt-Pd-интерметаллидов норильских руд (Пономаренко, Малов, 1991). Позднее С.Ф. Служеникин описал кобальтин в ассоциации с арсенидами никеля, самородным висмутом, минералами серебра, уранинитом (Служеникин, Мохов, 2002). В указанных работах приведены единичные химические анализы арсенидов и антимонидов, картины распределения элементов в их агрегатах.

Арсенидная минерализация Норильского рудного поля изучена нами по материалам собственных экспедиционных сборов 1998–2003 гг. (Талнахское и Октябрьское месторождения), более ранних сборов Э.А. Кулагова (Норильское месторождение), по коллекциям геологов Норильского комбината Е.В. Середы, С.Н. Белякова, А.Н. Глотова, В.Н. Серенко. Изучено несколько сотен образцов, включая крупные штуфы. Размер

большинства выделений арсенидов и антимонидов никеля и кобальта менее 3 мм. Для их выявления применялась распиловка образцов, в том числе вдоль малоощных карбонатных жил. Отдельные детали объемных соотношений арсенидов изучены с помощью рентгеновского микроанализатора ВТ50-1 ДИАТОМ. В 60 аншлифах и полированных шлифах сделано около 700 микроанализов рудных и жильных минералов, около 150 фотографий в отраженных электронах и картин распределения химических элементов в характеристическом излучении (рентгеновский микроанализатор САМЕСА SX-50; электронный микроскоп Link 10000, анал. Н.Н. Коротаяева). Определения содержаний Pd, Pt, Au в арсенидах из кальцитовых жил выполнены в лаборатории Г.М. Варшалл в ГЕОХИ РАН под руководством И.Я. Кошечевой. Термобарогеохимическое изучение флюидных включений в карбонатах арсенидных жил проведено в ИГЕМ РАН под руководством В.Ю. Прокофьева.

Геологическая позиция и параметры образования антимонидно-арсенидной минерализации Норильского рудного поля

Норильский район расположен в зоне краевых дислокаций на северо-западе Восточно-Сибирской платформы. Это область с максимальной мощностью плитного чехла, который образован несколькими структурными ярусами (Малич, 1975). Первый ярус состоит из морских отложений V-C₁ мощностью 3–8 км; это терригенно-карбонатные породы и эвапориты, в том числе ангидритовые породы с линзами галита и проявлениями нефтидов. Второй ярус сложен угленосными породами тунгусской серии C₂-P₁ мощностью до 1 км. Третий ярус образует трапшовая формация P₂-T₁ (245±5 млн. лет). Это лавовая толща базальтов с подчиненными туфами и иными вулканогенно-осадочными породами мощностью до 4 км, которую сопровождают многочисленные интрузивы долеритов и габбро-долеритов, в том числе рудоносные. На породах трапшовой формации отдельными пятнами залегают терригенные отложения J, K, KZ.

Рудоносные гипербазит-базитовые интрузивы — лентообразные тела мощностью до 300 м, которые контролируются зоной Норильско-Хараелахского разлома. Они пересекали и метаморфизовали осадочные толщи

силура и девона, угленосные породы тунгусской серии, низы трапшовой формации. Магматические сульфидные Ni-Cu руды (сплошные залежи, линзы, жилы, зоны вкрапленности) имеют возраст 245±3 млн. лет (Золотухин, 1997 и др.). Они залегают в придонных частях интрузивов и ниже интрузивов в пределах ореола контактового метаморфизма (Годлевский, 1959; Степанов, Туровцев, 1988).

Образования 1, 2 и 3 ярусов плитного чехла северо-запада Восточно-Сибирской платформы, включая габброиды безрудных и рудоносных интрузивов и магматические сульфидные руды, захвачены послетрапшовым региональным метаморфизмом (Спиридонов, Ладыгин, Симонов и др., 2000). Тренд метаморфизма: 1 стадия в условиях низкотемпературной части цеолитовой фации (232–196 млн. лет); 2 стадия в условиях от высокотемпературной части цеолитовой фации до пренит-пумпеллитовой фации (184–164 млн. лет); 3 стадия в условиях от высокотемпературной до наиболее низкотемпературной части цеолитовой фации (164–122 млн. лет) (Спиридонов и др., 2000). С первой стадией связаны цеолитовая, агатовая и датолитовая минерализации, которые были заметно преобразованы при метаморфизме второй стадии. С третьей стадией регионального метаморфизма связаны медно-цеолитовая формация, проявления сульфидов Zn, Pb, Cu, Mn, Cd, датолитовая, цеолитовая, арсенидная минерализации, месторождения исландского шпата. При этом магматические сульфидные и малосульфидные Ni-Cu руды испытали заметные преобразования, в отдельных участках существенные. В этих участках первичные сульфиды Fe-Cu-Ni замещены магнетитом, валлериитом, хизлевудитом, борнитом, пиритом, марказитом, макинавитом, миллеритом, халькозином, полидимитом, точилинитом, Со-пентландитом, годлевскитом, гематитом в ассоциации с ангидритом, карбонатами, хлоритом, серпентином, гидрогранатами, тальком, пренитом, вермикулитом, апофиллитом, корренситом, ксонотлитом, мусковитом, кварцем. На более ранних стадиях метаморфизма возникли минеральные ассоциации, богатые халькопиритом и миллеритом. Более поздние образования обогащены борнитом, еще более поздние — халькозином, наиболее поздние — пиритом, марказитом и тиошинелями Ni-Fe-Co.

Метаморфогенно-гидротермальная минерализация интенсивно проявлена в зонах трещиноватости, вблизи любых тектонических нарушений, особенно в зоне Нориль-

ко-Хараелахского разлома; а также среди осадочных пород, богатых ангидритом и глинистыми минералами. Сочетание этих двух факторов характерно для той части Талнахского месторождения, которая обрабатывается рудником Комсомольский. Однотипная арсенидная минерализация развита на всех месторождениях Норильского рудного поля, наиболее интенсивно в руднике Комсомольский.

Rb/Sr возраст апофиллита арсенидно-карбонатных жил Норильского рудного поля — 164 млн. лет (Спиридонов и др., 2001). Таким образом, арсенидная минерализация, которая рассматривалась как производная трапповой формации (Годлевский, 1959 и др.), моложе трапповой формации, более чем на 80 млн. лет.

Антимонидно-арсенидная минерализация развита в пределах залежей Ni-Cu руд и вне их отдельными пятнами, гнездами, жилами, в виде вкрапленности, цемента брекчий. Основная масса арсенидов Fe-Ni-Co и антимонидов Ni, самородного мышьяка находится в карбонатных, кальцит-ангидритовых, кальцит-апофиллитовых жилах и прожилках, нередко также содержащих сфалерит, вюрцит, халькопирит, галенит, пирротин, магнетит, алабандин, гринокит. Морфология карбонатно-арсенидных жил сложная, простирание преимущественно ССЗ, залегание обычно крутое до вертикального, реже пологое; длина от долей до 30 м, мощность до 60 см. Размер гнезд арсенидов в карбонатных жилах до 20 см. Кальцитовые и кальцит-ангидритовые жилы с самородным мышьяком и леллингитом развиты и в пределах сульфидных рудных залежей, и за их пределами. Карбонатные жилы с арсенидами Ni-Co-Fe и антимонидами Ni развиты среди сульфидных Ni-Cu руд и в ближней периферии их залежей. Вкрапленность арсенидов никеля развита в метаморфизованных Ni-Cu рудах миллерит-халькопиритового и пирит-борнит-миллеритового состава. Очевидно, источником Ni и Co антимонидно-арсенидной минерализации были окружающие сульфидные Ni-Cu руды. Источником As, возможно, также служили Ni-Cu руды, содержание As в которых до 47 г/т (Czamanske *et al.*, 1992). В богатых арсенидами жилах обычно преобладает кальцит, доломита и ангидрита не много. Вдоль контактов этих жил в Ni-Cu рудах в полосе 1 — 2 см пирротин и халькопирит частично замещены кальцитом и сфалеритом.

Кальцит в жилах с арсенидами и антимонидами содержит первичные газовой-жидкие

включения невысокой солености — 0.2—1.4% экв. NaCl, преобладающие компоненты в растворе включений — NaCl и MgCl₂. Давление и температура, определенные по этим включениям, — от 0.9—0.5 до 0.1 кбар и 216—203—181—175—172—147—127°C. Наши оценки температур близки к результатам, приведенным в работе В.В. Дистлера и соавторов. Параметры P и T арсенидной минерализации соответствуют параметрам формирования цеолитовой фации.

Новые фактические данные свидетельствуют о том, что гидротермальная антимонидно-арсенидная минерализация Норильского рудного поля сопряжена с послетрапповым региональным метаморфизмом в условиях цеолитовой фации.

Стадийность антимонидно-арсенидной минерализации Норильского рудного поля

Антимонидно-арсенидная минерализация Норильского рудного поля многостадийная. Изредка наблюдаются пересечения арсенидно-карбонатных жил различного минерального состава. Чаще брекчированные ранние минеральные агрегаты обросли и/или частично замещены более молодыми минеральными комплексами. Арсенидно-карбонатные жилы часто зональны. Зальбанды жил обычно сложены более ранними минеральными ассоциациями, центральные части жил — более поздними. По сумме таких наблюдений и с учетом результатов детальных минералогических исследований выделены три цикла антимонидно-арсенидной минерализации, каждый из которых представлен несколькими минеральными комплексами. Минеральный комплекс может включать несколько зарождений арсенидов и антимонидов. Минеральные агрегаты арсенидов и антимонидов часто представлены сферокристаллами и их срастаниями. Последние обычно именуются бобовинами или почками.

Антимонидно-арсенидная минерализация первого цикла тесно ассоциирует с борнит-содержащими рудами. Общий тренд — от моноарсенида Ni к ди- и триарсенидам Ni и Co. Первый цикл завершается образованием самородного мышьяка. Антимонидно-арсенидная минерализация второго цикла тесно ассоциирует с халькозин-содержащими рудами. Общий тренд — от диарсенидов к антимониду и моноарсениду Ni. Характерно наличие самородного серебра, сульфидов сереб-

ра, ртутистого серебра. Минерализация третьего сульфоантимонидно-сульфоарсенидного цикла ассоциирует с пирит-содержащими рудами.

Первый цикл включает девять разновозрастных минеральных комплексов. Первый — кобальтин-герсдорфит-маухерит-никелиновый комплекс представлен бобовинами в жилах белого кальцита и хлорит-кальцитом в метаморфизованных Ni-Cu рудах. Второй — маухерит-герсдорфит-никелиновый комплекс представлен зональными почками и бобовинами, которые выросли на агрегаты первого комплекса и частью заместили их. Характерно сочетание низкосурьмянистого и высокосурьмянистого никелина. Третий комплекс представлен срастаниями маухерита и брейтгауптита, которые слагают обособленные выделения или выросли на агрегаты 2-ого комплекса; они оторочены Sb-никелином и раммельсбергитом. Агрегаты четвертого — раммельсбергит-никелин-брейтгауптитового комплекса выросли на агрегаты первого и третьего комплексов, частью замещая их. Четвертый комплекс включает полную серию минералов ряда никелин-брейтгауптит. Пятый — кобальтин-брейтгауптит-маухерит-никелиновый комплекс представлен зональными почками в жилах розового кальцита; характерно отсутствие промежуточных членов ряда никелин-брейтгауптит. Маухерит, брейтгауптит и Со-никелин шестого минерального комплекса выросли на агрегаты пятого комплекса. В седьмом комплексе преобладают диарсениды (раммельсбергит, леллингит), чередующиеся с никелином. Кальцит-доломитовые жилы с триарсенидами Ni-Co 8-ого минерального комплекса секут арсенидно-кальцитовые жилы. Триарсениды 8-ого комплекса выросли на раммельсбергит 7-ого комплекса. Еще более поздние и относительно распространенные кальцит-ангидритовые и кальцит-апофиллитовые жилы с гнездами и сферолитовыми агрегатами самородного мышьяка и леллингита, выделены как 9-ый комплекс. Минералы 9-ого минерального комплекса часто слагает центральные части жил, зальбанды которых образованы агрегатами арсенидов 7-ого комплекса.

Второй цикл характеризуется преобладанием антимонида Ni, с трендом от диарсенидов к антимониду и моноарсениду Ni, характерно наличие паркерита, самородных серебра, висмута и свинца, ртутистого серебра, пираргирита, клаусталита, уранинита. Второй цикл включает два минеральных комплекса. Никелин, брейтгауптит, диарсениды

Ni и Fe и маухерит 10-ого минерального комплекса слагают сложнотональные почки. Sb-никелин и брейтгауптит 11-ого комплекса образуют срастания с самородным серебром, ртутистым серебром, пираргиритом.

Третий цикл включает один — 12-ый минеральный комплекс, существенно сульфоарсенидно-сульфоантимонидный. Среди арсенидных почек первых двух циклов 12-ый минеральный комплекс представлен каймами замещения и секущими прожилками сульфоарсенидов, среди арсенидно-антимонидных почек второго цикла — каймами замещения и секущими прожилками ульманнита.

Минералы ряда никелин-брейтгауптит Норильского рудного поля

Представляется целесообразным дать характеристику этих минералов отдельно для конкретных минеральных комплексов. 8-ой, 9-ый и 12-ый минеральные комплексы не содержат минералы ряда никелин-брейтгауптит.

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

1-ый минеральный комплекс. Первый минеральный комплекс представлен крупными пластинчатыми кристаллами безсурьмянистого никелина; бобовинами, сложенными расщепленными кристаллами никелина, Sb-никелина, маухерита, выросшими на сфалерит и вюртцит; каемками Sb-никелина на сфалерите и халькопирите и маухерита на борните и миллерите.

Наиболее ранние из этих образований — каймы Sb-никелина вокруг кристаллов сфалерита и халькопирита (рис. 1а). Содержание сурьмы в этом никелине варьирует от 3 до 20 мас.% (табл. 1, ан. 443, 495). Центральные части бобовин сложены агрегатами высокосурьмянистого никелина в срастании с отдельными почками маухерита (рис. 1б); содержание сурьмы в никелине — до 22 мас.% (ан. 458, 556). На них выросли тонкорасщепленные агрегаты малосурьмянистого и безсурьмянистого никелина, далее длинные (1 — 15 мм) тонкие (0.01 — 0.05 мм) пластинчатые кристаллы безсурьмянистого никелина (ан. 544, 558). Характерные образования 1-ого комплекса — длинные пластины никелина, обрамленные агрегатом Fe-Co-герсдорфита и Ni-кобальтина (рис. 1с,д).

Содержание сурьмы в никелине I — от 1 до 22 мас.%, понижается от центра бобовин

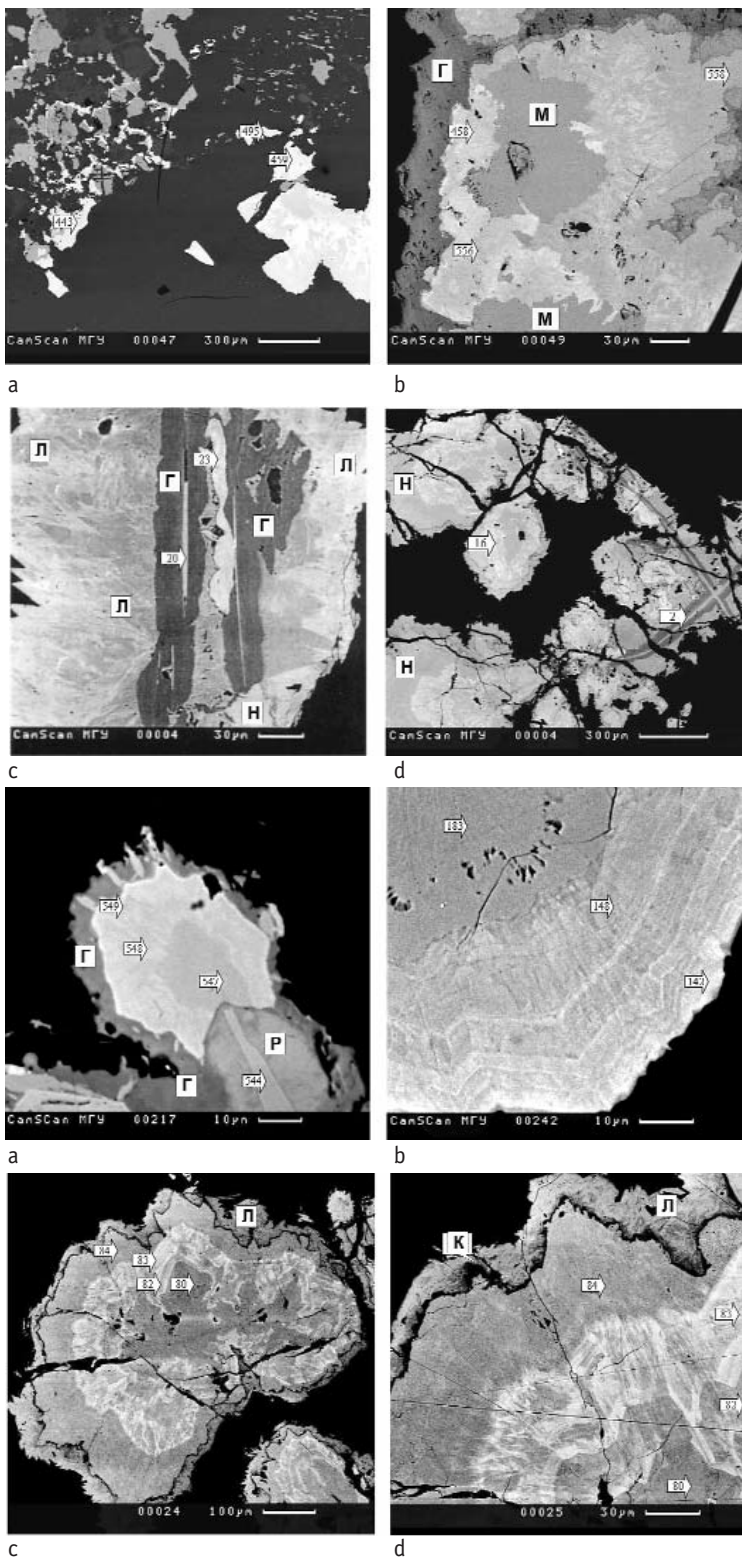


Рис. 1. Арсениды 1-ого и 2-ого минеральных комплексов. Матрица — кальцит (черное). Талнах, рудник Комсомольский. а — Sb-никелин I (белое, ан. 443, 459, 495), наросший на халькопирит и сфалерит (серое); б — Агрегат арсенидов 1-ого минерального комплекса. Срастание высокосурьмянистого никелина (белое, ан. 458, 556) и маухерита (серое, «М»), на которые нарос малосурьмянистый и Sb-никелин (светло-серое) с рисунком зоны геометрического отбора; далее — малосурьмянистый никелин (серое, ан. 558); далее — раммельсбергит и герсдорфит (темно-серое, «Г»); с — Соотношения 1-ого и 2-ого минеральных комплексов. 1-ый минеральный комплекс: пластинчатые кристаллы безсурьмянистого никелина I (светло-серое, ан. 20), окруженные агрегатом герсдорфита и кобальтина (темно-серое, «Г»), на которые наросли расщепленные кристаллы леллингита с рисунком зоны геометрического отбора (светло-серое, до белого, «Л»). 2-ой минеральный комплекс: метасомы Sb-никелина II (белое, ан. 23, «Н»). Никелин II срезает границы минералов 1-ого комплекса. d — Крестообразное срастание пластинчатых кристаллов безсурьмянистого никелина I (ан. 2), окаймленных герсдорфитом и кобальтином (темно-серое), леллингитом (серое) 1-ого минерального комплекса. На них наросли зональные почки Sb-никелина II («Н», ан. 16) 2-ого минерального комплекса. Фотографии в отраженных электронах

Рис. 2. Бобовины арсенидов 2-ого минерального комплекса. Матрица — кальцит (черное). Талнах, рудник Комсомольский. а — «Шапочка» нарастания — зональная почка никелина II (ан. 547) и Sb-никелина II (ан. 548, 549) на пластинчатом кристалле никелина I (ан. 544) и на раммельсбергите («Р»). Вокруг «шапочки» — кайма герсдорфита («Г»); б — Фрагмент «шапочки» никелина II: в центре — малосурьмянистый никелин (ан. 183), внешняя зона — тонко зональный Sb-никелин (ан. 142, 148); с — Бобовина никелина II с каймой леллингита («Л») и прожилками кальцита (черное). Никелин (ан. 80, 84), Sb-никелин (ан. 82, 83); d — Фрагмент рисунка 2с. Никелин оторочен кобальтином («К») и леллин-

Таблица 1. Химический состав никелина и Sb-никелина 1-ого минерального комплекса (рис. 1, 2а)

№	Элемент, мас.%									Формульные единицы в расчете на 2 атома									
	Ni	Co	Fe	Cu	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Cu	Сумма	As	Sb	S	Se	Сумма
20	43.56	1.50	0.22	—	55.13	1.40	0.06	0.19	102.04	0.973	0.033	0.005	—	1.012	0.967	0.015	0.002	0.003	0.988
544	41.12	1.64	1.67	—	53.58	1.96	1.45	—	101.22	0.913	0.036	0.039	—	0.988	0.932	0.021	0.059	—	1.012
443	42.16	0.14	1.33	0.05	48.98	4.96	1.53	0.29	99.44	0.963	0.003	0.032	0.001	0.999	0.877	0.055	0.064	0.005	1.001
558	41.24	1.19	0.01	—	51.76	6.88	0.18	—	101.26	0.952	0.027	—	—	0.979	0.936	0.077	0.008	—	1.021
495	42.65	0.47	0.25	—	45.99	11.71	0.01	0.21	101.29	1.001	0.011	0.006	—	1.018	0.846	0.132	0.001	0.004	0.982
556	40.93	0.35	0.22	—	43.57	14.71	1.13	—	100.91	0.965	0.008	0.006	—	0.979	0.805	0.167	0.049	—	1.021
459	39.83	0.11	0.37	0.05	37.23	20.36	1.22	0.30	99.47	0.974	0.003	0.009	0.001	0.987	0.713	0.240	0.055	0.005	1.013
458	39.17	0.14	0.19	—	35.79	22.26	0.14	0.29	98.18	0.997	0.003	0.005	—	1.006	0.710	0.272	0.007	0.005	0.994

Примечание. В таблицах 1-9 анализы выполнены с помощью рентгеновского микроанализатора Cateca SX-50. Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 20 нА, Аналитики Н.Н. Кононова, И.А. Брызгалов; прочерк в таблице означает, что содержание элемента ниже чувствительности метода и/или элемент не определялся. Номера анализов в таблицах и на рисунках одни и те же

Таблица 2. Химический состав никелина и Sb-никелина 2-ого минерального комплекса (рис. 1с,d; 2а,b; 3б)

№	Элемент, мас.%									Формульные единицы в расчете на 2 атома									
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Te	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Te	Сумма
547	42.30	0.41	1.36	55.17	1.34	1.47	—	—	102.05	0.933	0.009	0.032	0.973	0.953	0.014	0.059	—	—	1.027
183	43.56	1.50	0.22	55.13	1.40	0.06	—	—	101.87	0.971	0.033	0.005	1.009	0.974	0.015	0.002	—	—	0.991
531	41.84	0.62	0.73	51.22	2.99	1.46	—	—	98.86	0.957	0.014	0.017	0.988	0.918	0.033	0.061	—	—	1.012
548	43.02	0.38	1.51	49.26	5.05	1.79	—	—	101.01	0.964	0.009	0.035	1.008	0.865	0.055	0.073	—	—	0.992
148	42.05	0.38	2.40	47.38	6.18	2.19	0.27	0.06	100.85	0.943	0.008	0.056	1.007	0.833	0.066	0.089	0.004	0.001	0.993
532	41.02	0.53	1.16	47.08	8.80	2.16	—	—	100.74	0.934	0.012	0.028	0.974	0.84	0.097	0.09	—	—	1.026
16	40.45	1.01	0.06	46.26	8.97	0.20	0.17	0.04	97.15	0.98	0.024	0.001	1.005	0.878	0.105	0.009	0.003	—	0.995
549	41.25	0.13	1.25	47.14	10.87	1.41	—	—	102.06	0.943	0.003	0.03	0.976	0.845	0.12	0.059	—	—	1.024
23	38.63	2.35	0.71	50.57	5.16	0.53	—	—	97.96	0.965	0.029	0.003	0.997	0.844	0.128	0.031	—	—	1.003
142	42.81	0.11	0.02	41.47	17.30	0.17	0.19	0.11	102.07	1.015	0.003	—	1.018	0.773	0.198	0.007	0.003	0.001	0.982

Таблица 3. Химический состав никелина и Sb-никелина обособленных почек 2-ого минерального комплекса (рис. 2с,d)

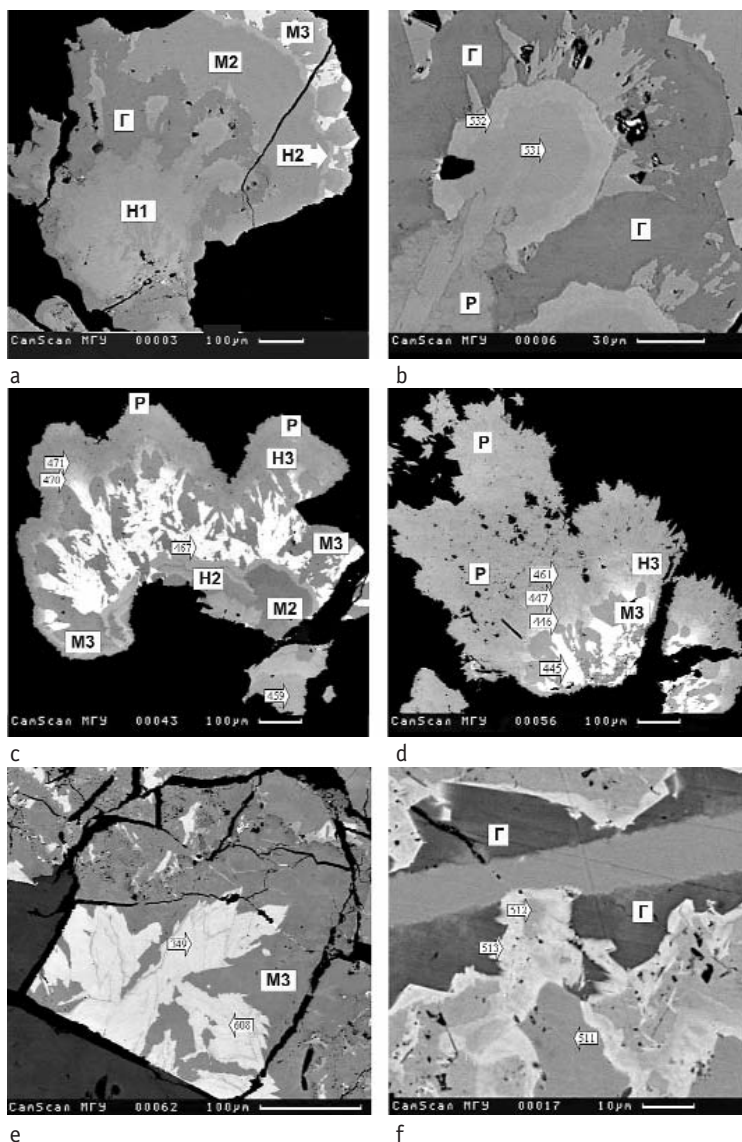
№	Элемент, мас.%									Формульные единицы в расчете на 2 атома									
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Te	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Te	Сумма
80	42.37	1.69	0.15	51.58	2.01	0.49	0.22	0.07	98.51	0.954	0.040	0.004	0.997	0.955	0.023	0.021	0.004	0.001	1.003
71	41.92	0.81	0.11	52.31	2.45	0.13	0.22	0.10	98.05	0.981	0.018	0.003	1.002	0.959	0.028	0.006	0.004	0.001	0.998
63	47.94	1.50	0.11	46.39	3.51	0.55	—	—	100.00	0.959	0.030	0.002	0.991	0.928	0.070	0.011	—	—	1.009
84	40.31	1.68	0.19	49.86	6.52	0.37	—	—	98.93	0.947	0.039	0.005	0.991	0.919	0.074	0.016	—	—	1.009
82	40.58	1.04	—	46.13	9.32	0.32	0.15	0.06	97.54	0.978	0.025	—	1.003	0.871	0.108	0.014	0.003	0.001	0.997
75	40.26	0.79	—	45.88	9.73	0.18	0.20	0.10	97.14	0.979	0.019	—	0.998	0.874	0.115	0.008	0.004	0.001	1.002
83	41.56	1.00	—	44.05	12.60	0.60	0.23	0.11	100.04	0.971	0.024	—	0.995	0.825	0.148	0.027	0.004	0.001	1.005
69	41.10	0.42	0.11	42.11	14.09	0.77	0.23	0.11	98.94	0.990	0.010	0.002	1.002	0.795	0.164	0.034	0.004	0.001	0.998

к краю. Пластинчатые кристаллы никелина I бедны сурьмой (ан. 20, 544). Содержание серы, кобальта и железа в никелине I — до 2 мас. %.

Рентгенограмма безсурьмянистого никелина пластинчатых кристаллов: 2.65Å (10) (101); 2.348 (2) (202); 1.960 (10) (102); 1.810 (5) (110); 1.479 (3) (103); параметры элементарной ячейки a_0 3.58 (1)Å и c_0 5.02 (6)Å отвечают стандартному никелину.

2-ой минеральный комплекс. 2-ой комплекс включает агрегаты тонкорасщепленных кристаллов малосурьмянистого и Sb-никелина, герсдорфита, маухерита, кобальтина — сложнзональные бобовины с поперечником 0.5–5 мм.

Наиболее распространены ранние образования 2-ого комплекса: а) никелин II метасоматических вростков в агрегатах никелина I, кобальтина и герсдорфита. Никелин II срезает их границы и рисунок их зональности (рис. 1с); б) никелин II «шапочек» на пластинах никелина I с кобальтин-герсдорфитовой оторочкой или без неё (рис. 1d, 2а,b, 3а). Никелин «шапочек» по составу тонкозональный. Содержание сурьмы к краям «шапочек» возрастает до 20 мас. % (табл. 2, ан. 142, 148, 183, 547–549); в) никелин II обособленных почек, в центре обычно малосурьмянистый (табл. 3, ан. 63, 80), в остальном их объеме содержание сурьмы — от следов до 15 мас. % (табл. 3, ан. 69, 71, 75, 82, 83.). Шири-



гитом («Л»). Фотографии в отраженных электронах
Рис. 3. Соотношения 1-ого, 2-ого, 3-его и 4-ого минеральных комплексов. a-d, f – рудник Комсомольский, Талнах. e – рудник Октябрьский, Талнах.
a – Бобовина арсенидов 1-ого, 2-ого и 3-его минеральных комплексов. 1-ый комплекс: в основании агрегат низкосурьмянистого никелина I («Н1») с выступающими кристаллами, на них нарост раммельсбергит (темно-серое). 2-ой комплекс: «шапочки» никелина II (на подложке 1-ого комплекса), далее – пластины никелина в массе герсдорфита («Г») (лучше видны на рис. 3b), далее – маухерит («М2») с тонкой каймой Sb-никелина («Н2»). 3-ий комплекс: сростание брейтгауптита (белое) и маухерита (серое, «М2»); b – Фрагмент рисунка 3a. Никелин II (ан. 531, 532). Раммельсбергит («Р»), герсдорфит («Г»); c – Бобовина 2-ого и 3-ого комплексов. 2-ой комплекс: агрегат маухерита («М2»), никелина и Sb-никелина («Н2»). 3-ий комплекс: сростание брейтгауптита (белое, ан. 467) и маухерита («М3»), оторочка – Sb-никелин («Н3», ан. 470, 471), кайма – раммельсбергит («Р»); d – Бобовина полно проявленного 3-ого комплекса. Ранние – брейтгауптит (ан. 445) и маухерит (темно-серое, «М3»), более поздний – Sb-никелин («Н3», ан. 446, 447, 461), наиболее поздний – Fe-раммельсбергит («Р»); e – Обособленное выделение ранних минералов 3-ого комплекса. Сростание брейтгауптита (ан. 349, 608) и маухерита («М») на подложке вюртцита (темно-серое); f – Пластинчатый кристалл никелина с оторочкой герсдорфита («Г») 1-ого комплекса частично замещен арсенидами 4-ого комплекса – малосурьмянистым никелином (ан. 511) и

на зон с различной концентрацией сурьмы – от 10 до 100 мкм (рис. 2c,d), число таких зон достигает 15. Некоторые почки оторочены кобальтином.

Менее распространены поздние образования 2-ого комплекса: пластины никелина в массе герсдорфита (рис. 3b) и маухерит с прерывистой подложкой и тонкой каймой Sb-никелина (рис. 3b,c).

Концентрация кобальта в никелине II – до 1.5 мас.%, железа – до 2.5 мас.%. Коэффициенты парной корреляции содержаний Ni-Co = -0.95; Ni-Fe = -0.77 (выборка содержит 47 анализов) свидетельствуют об изоморфном замещении никеля кобальтом и железом. Высокосурьмянистый никелин обычно

менее кобальтистый, чем малосурьмянистый; коэффициент парной корреляции Sb-Co = -0.45. В никелине пластинчатых кристаллов и обособленных почек – Co > Fe, в никелине «шапочек» – Fe > Co.

3-ий минеральный комплекс. Ранние образования 3-его комплекса – сростания маухерита и брейтгауптита I входят в состав сложнзональных бобовин, нарастая на агрегаты 2-ого комплекса; в их основании развита зона геометрического отбора (рис. 3a,c). Кроме того, они слагают центральные части обособленных бобовин 3-его комплекса (рис. 3d) и обособленные почковидные агрегаты, выросшие на вюртцит (рис. 3e). Ближе к краю почек брейтгауптит сменяется As-брейтгауп-

Таблица 4. Химический состав минералов ряда никелин-брейтгауптит 3-его минерального комплекса (рис. 3с-е)

№	Элемент, мас.%								Формульные единицы в расчете на 2 атома										
	Ni	Co	Fe	Cu	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Cu	Сумма As	Sb	S	Se	Сумма	
461	42.65	0.09	2.69	0.09	46.89	5.27	2.64	0.27	100.59	0.948	0.002	0.063	0.002	1.015	0.817	0.056	0.108	0.005	0.985
471	38.96	0.87	0.88	0.07	49.85	9.70	0.21	0.26	100.78	0.915	0.020	0.022	0.001	0.959	0.918	0.110	0.009	0.005	1.041
470	40.96	0.53	0.10	0.03	44.54	14.31	—	0.29	100.75	0.979	0.013	0.003	0.001	0.995	0.835	0.165	—	0.005	1.005
460	42.38	0.11	0.29	—	37.41	17.53	2.45	0.31	100.47	0.994	0.002	0.007	—	1.004	0.688	0.198	0.105	0.005	0.996
447	40.58	0.48	0.17	0.04	41.46	17.47	0.06	0.22	100.47	0.984	0.011	0.004	0.001	1.001	0.788	0.204	0.003	0.004	0.999
446	40.43	0.15	0.03	0.08	32.87	27.37	0.02	0.19	101.14	1.013	0.004	0.001	0.002	1.019	0.645	0.331	0.001	0.004	0.981
349	33.10	—	—	—	5.27	63.81	0.31	0.16	102.66	0.964	—	—	—	0.964	0.120	0.896	0.016	0.003	1.036
467	33.31	—	0.04	—	2.21	64.00	0.61	0.17	100.35	0.991	—	0.001	—	0.993	0.052	0.919	0.033	0.004	1.007
608	32.92	—	—	0.26	2.61	64.52	0.53	0.16	100.95	0.980	—	—	0.007	0.987	0.061	0.921	0.029	0.002	1.013
445	32.45	—	—	0.18	2.62	64.19	0.38	0.26	100.07	0.976	—	—	0.005	0.981	0.062	0.931	0.021	0.006	1.019

Таблица 5. Химический состав минералов ряда никелин-брейтгауптит 4-ого минерального комплекса (рис. 3ф, 4)

№	Элемент, мас.%								Формульные единицы в расчете на 2 атома										
	Ni	Co	Fe	Cu	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Cu	Сумма As	Sb	S	Se	Сумма	
496	44.08	0.56	0.58	0.03	52.72	0.96	1.16	0.23	100.32	0.987	0.012	0.014	0.001	1.014	0.925	0.010	0.047	0.004	0.986
511	44.70	0.47	0.08	0.13	52.62	2.85	0.41	0.35	101.61	1.005	0.011	0.002	0.003	1.019	0.927	0.031	0.017	0.006	0.981
512	43.69	0.86	0.01	0.05	52.89	3.08	0.09	0.37	101.04	0.993	0.019	—	0.001	1.014	0.942	0.034	0.004	0.006	0.986
497	42.08	0.75	0.74	0.11	46.83	6.54	2.42	0.31	99.79	0.954	0.017	0.018	0.002	0.991	0.832	0.071	0.101	0.005	1.009
503	42.06	0.52	0.21	—	47.91	8.66	0.01	0.24	99.60	0.993	0.012	0.005	—	1.010	0.886	0.099	—	0.004	0.990
513	41.92	0.08	0.12	0.08	39.38	19.60	0.14	0.26	101.58	1.011	0.002	0.003	0.002	1.017	0.744	0.228	0.006	0.005	0.983
502	39.69	0.20	0.06	0.07	33.82	26.85	0.03	0.21	100.93	0.996	0.005	0.002	0.002	1.004	0.665	0.325	0.001	0.004	0.996
500	37.16	0.05	0.01	0.02	21.99	41.06	0.02	0.19	100.51	0.998	0.001	—	0.001	1.000	0.463	0.532	0.001	0.004	1.000
499	36.82	0.14	0.03	—	16.14	49.73	0.03	0.12	103.00	0.998	0.004	0.001	—	1.003	0.343	0.650	0.002	0.002	0.997
501	34.28	0.05	—	0.08	9.15	57.34	0.05	0.16	101.11	0.987	0.002	—	0.002	0.991	0.207	0.796	0.003	0.003	1.009
498	33.59	0.07	0.05	0.05	4.41	63.25	0.14	0.23	101.78	0.986	0.002	0.001	0.001	0.991	0.101	0.895	0.007	0.005	1.009

Таблица 6. Химический состав брейтгауптита и никелина 5-ого минерального комплекса (рис. 6)

№	Элемент, мас.%								Формульные единицы в расчете на 2 атома										
	Ni	Co	Fe	Cu	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Cu	Сумма As	Sb	S	Se	Сумма	
226	33.28	0.02	0.01	0.03	2.52	65.24	0.02	0.13	101.24	0.995	0.001	—	0.001	0.997	0.059	0.941	0.001	0.002	1.003
230	33.39	0.04	0.06	0.08	2.10	65.93	0.05	0.15	101.80	0.994	0.001	0.002	0.002	0.999	0.049	0.946	0.003	0.003	1.001
243	33.26	0.08	0.00	0.16	1.79	67.05	0.08	0.31	102.73	0.985	0.002	—	0.004	0.991	0.042	0.957	0.004	0.005	1.009
242	34.54	9.99	0.22	—	50.74	3.87	0.07	0.29	99.72	0.797	0.230	0.005	—	1.032	0.918	0.043	0.003	0.005	0.968
239	40.79	2.96	0.11	0.05	52.21	3.39	0.03	0.42	99.96	0.940	0.068	0.003	0.001	1.012	0.943	0.038	0.001	0.007	0.988
225	42.75	2.21	0.04	0.10	52.50	3.93	0.03	0.28	101.80	0.968	0.050	0.001	0.002	1.020	0.931	0.043	0.001	0.005	0.980

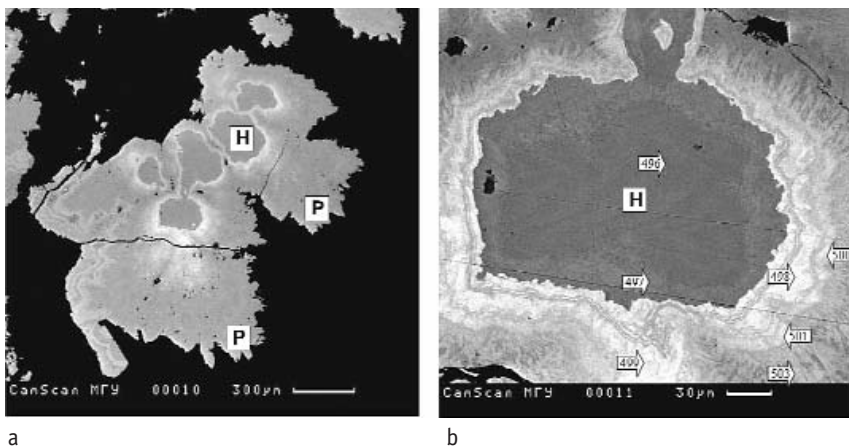
титом, затем Sb-никелином III, далее безсурьмянистым никелином с каймой Fe-раммельсбергита (рис. 3d).

3-ий комплекс включает минералы непрерывного ряда брейтгауптит-никелин (табл. 4). В никелине III и промежуточных членах ряда никелин-брейтгауптит содержание серы, кобальта и железа выше, чем в брейтгауптите I: S — до 2.6 мас.%, Co и Fe — до 2.5–3 мас.%

4-ый минеральный комплекс. Агрегаты минералов 4-ого комплекса выросли на агрегаты 1-ого и 3-ого комплексов и частично их заместили (рис. 3ф). В большинстве случаев они образуют обособленные почки и бобовины (рис. 4а, б). Интенсивно расщепленные кристаллы малосурьмянистого никелина (первое зарождение) слагают центральные части почек, которые окружены узкой зоной

никелина с 5–7 мас.% Sb (табл. 5, ан. 497) (второе зарождение). На этот никелин выросли тонко чередующиеся As-брейтгауптит и Sb-никелин (третье зарождение), раммельсбергит. Содержание кобальта и железа в никелине IV и брейтгауптите II — менее 1 мас.%. Содержание серы в никелине первого зарождения — 1–2.5 мас.%. Никелин второго и третьего зарождений и брейтгауптит содержат менее 0.5 мас.% серы.

5-ый минеральный комплекс. 5-ый комплекс представлен сложно зональными почками безсурьмянистого, безкобальтислого и Co-никелина V, брейтгауптита III, маухерита, кобальтина (рис. 5, б). Центральные части почек обычно сложены сростаниями мелких кристаллов брейтгауптита и Co-никелина (табл. 6., ан. 239) с каймой ко-



Sb-никелином (ан. 512, 513); Фотографии в отраженных электронах

Рис. 4. Почка 4-ого минерального комплекса в кальците (черное). Талнах, рудник Комсомольский. На малосурьмянистый никелин («Н», ан. 496, 497) нарости бейтгауптит (ан.



498–500), *Sb*-никелин (ан. 501, 503), раммельсбергит (серое, «Р»). Фотографии в отраженных электронах
Рис. 5. Арсениды (белое) 5-ого и 6-ого минеральных комплексов в карбонатной жиле. Рудник Октябрьский, Талнах. Полированный шлиф. Ширина поля зрения 35 мм

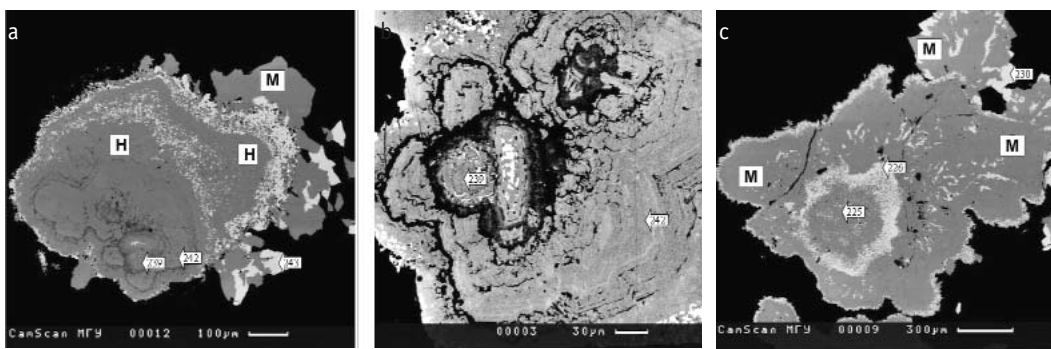


Рис. 6. Фрагменты рисунка 5. 5-ый и 6-ой минеральные комплексы. а – 5-ый комплекс: ранние бейтгауптит (белое) и *Co*-никелин (ан. 239) с каймой кобальтина (черное); более поздние – *Co*-никелин (ан. 242) с тонкими зонами кобальтина (черное); еще более поздние – никелин («Н») с вростками бейтгауптита (белое); наиболее поздние – мелкие кристаллы бейтгауптита. 6-ой комплекс: срастание крупных кристаллов маухерита («М») и бейтгауптита (ан. 243) – кайма вокруг арсенидов 5-ого комплекса; b – Деталь рисунка 6 а; c – 5-ый комплекс: никелин (ан. 225), окруженный мелкозернистым бейтгауптитом (ан. 226). 6-ой комплекс маухерит («М») с включениями бейтгауптита (белое) и

Таблица 7. Химический состав Со-никелина и брейтгауптита 6-ого минерального комплекса (рис. 7)

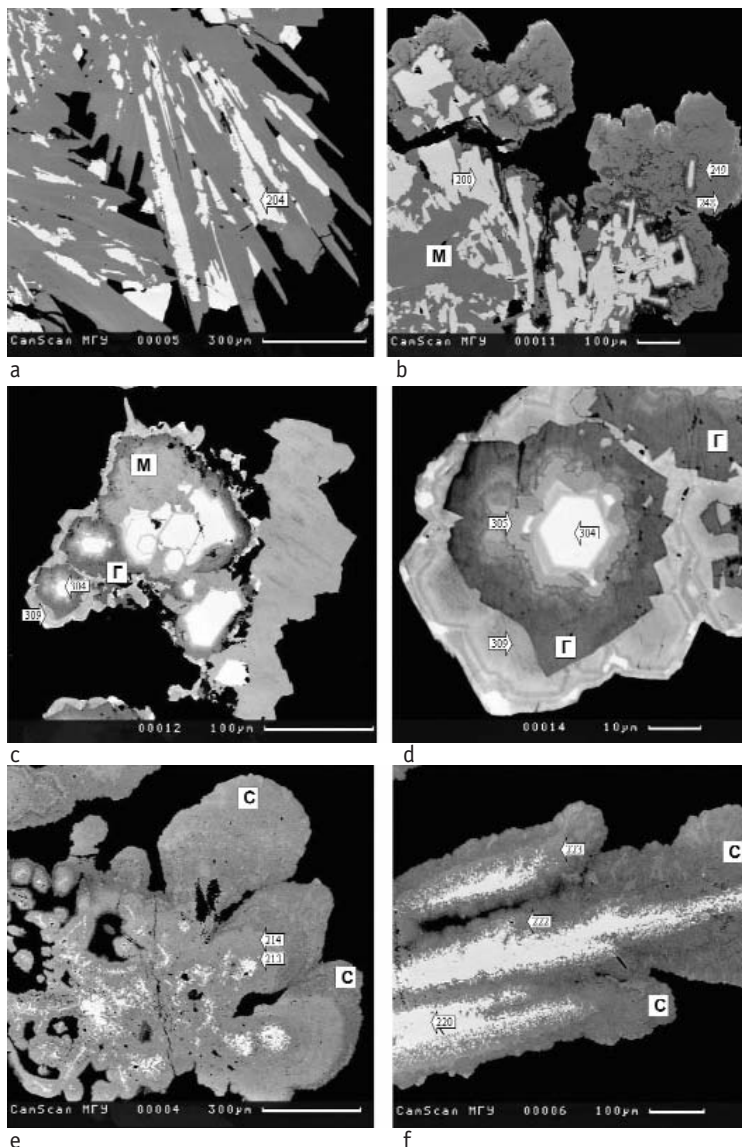
№	Элемент, мас.%								Формульные единицы в расчете на 2 атома										
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Te	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Te	Сумма
305	36.40	2.00	0.10	32.28	29.83	0.06	0.14	—	100.80	0.974	0.028	0.002	1.004	0.855	0.134	0.002	0.004	0.001	0.996
309	40.92	1.17	0.06	45.89	11.64	0.04	0.22	0.05	99.97	0.928	0.051	0.003	0.981	0.646	0.367	0.003	0.003	—	1.019
213	41.49	2.79	0.07	52.85	2.58	0.02	0.22	0.06	100.07	0.951	0.064	0.002	1.017	0.949	0.028	0.001	0.004	0.001	0.983
222	38.43	4.81	0.06	51.31	6.45	0.02	0.27	0.07	101.40	0.885	0.11	0.001	0.996	0.925	0.072	0.001	0.005	0.001	1.004
248	37.55	6.62	0.19	50.33	5.96	0.10	0.15	0.03	100.92	0.863	0.152	0.005	1.020	0.907	0.066	0.004	0.003	—	0.98
223	34.95	9.35	0.25	51.66	4.85	0.04	0.20	0.01	101.30	0.798	0.213	0.006	1.017	0.925	0.053	0.002	0.003	—	0.983
242	34.54	9.99	0.22	50.74	3.87	0.07	0.24	0.05	99.72	0.797	0.23	0.005	1.032	0.917	0.043	0.003	0.004	0.001	0.968
249	33.36	10.04	0.32	50.95	3.40	0.99	0.30	0.05	99.40	0.764	0.229	0.008	1.001	0.913	0.038	0.042	0.005	0.001	0.999
214	30.74	12.98	0.29	52.76	2.44	0.06	0.26	—	99.52	0.708	0.298	0.007	1.013	0.954	0.027	0.002	0.004	—	0.987
220	33.35	0.27	0.03	5.21	62.08	0.03	0.12	0.08	101.17	0.983	0.008	0.001	0.992	0.120	0.882	0.002	0.003	0.001	1.008
304	32.21	0.12	0.10	0.63	67.85	0.08	0.12	—	101.10	0.977	0.004	0.003	0.984	0.015	0.994	0.004	0.003	—	1.016

Таблица 8. Химический состав минералов ряда никелин-брейтгауптит 10-ого минерального комплекса (рис. 8а-с)

№	Элемент, мас.%								Формульные единицы в расчете на 2 атома										
	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Se	Te	Сумма	Ni	Co	Fe	Сумма	As	Sb	S	Se	Te	Сумма
679	44.02	0.09	1.71	50.02	1.54	2.16	0.19	0.01	99.75	0.979	0.002	0.040	1.021	0.871	0.017	0.088	0.003	—	0.979
677	42.77	0.13	—	51.44	6.78	0.02	0.21	0.04	101.40	0.987	0.003	—	0.990	0.930	0.075	0.001	0.004	—	1.010
639	41.33	0.31	0.34	44.42	15.54	0.00	0.13	0.03	102.09	0.979	0.007	0.009	0.995	0.825	0.178	—	0.002	—	1.005
644	40.54	0.06	0.32	36.13	24.23	0.08	0.18	0.08	101.61	0.998	0.001	0.008	1.008	0.697	0.288	0.003	0.003	0.001	0.992
641	38.90	0.09	0.10	28.64	31.91	0.05	0.10	—	99.79	1.009	0.002	0.003	1.014	0.582	0.399	0.002	0.002	—	0.986
661	37.36	0.08	0.03	29.06	35.45	0.05	0.12	0.04	102.18	0.964	0.002	0.001	0.966	0.588	0.441	0.003	0.002	—	1.034
633	37.28	0.17	0.05	27.07	36.43	0.11	0.17	0.01	101.29	0.973	0.004	0.001	0.979	0.554	0.459	0.005	0.003	—	1.021
634	32.77	0.19	—	3.30	65.24	0.29	0.16	—	101.95	0.969	0.006	—	0.974	0.076	0.930	0.016	0.004	—	1.026
678	33.02	—	—	3.86	65.51	0.22	0.08	0.04	102.74	0.969	—	—	0.969	0.089	0.928	0.012	0.002	0.001	1.031
675	31.66	—	0.08	2.68	65.82	0.24	0.18	—	100.66	0.957	—	0.003	0.960	0.063	0.960	0.013	0.004	—	1.040
638	33.31	—	0.02	3.19	65.91	0.01	0.11	0.09	102.63	0.983	—	0.001	0.984	0.074	0.938	—	0.002	0.001	1.016
630	32.85	—	—	2.10	66.81	0.76	0.17	—	102.69	0.963	—	—	0.963	0.048	0.944	0.041	0.004	—	1.037

Таблица 9. Химический состав минералов ряда никелин-брейтгауптит 11-ого минерального комплекса (рис. 8d)

№	Элемент, мас.%								Формульные единицы в расчете на 2 атома										
	Ni	Co	Fe	Hg	As	Sb	S	Se	Сумма	Ni	Co	Fe	Hg	Сумма	As	Sb	S	Se	Сумма
575	45.00	0.25	0.04	—	49.00	6.82	1.19	0.19	102.49	1.007	0.006	0.001	—	1.014	0.860	0.074	0.049	0.003	0.986
576	44.44	0.32	—	—	50.02	3.87	2.08	0.23	100.96	0.991	0.007	—	—	0.998	0.871	0.042	0.085	0.004	1.002
579	43.50	0.20	0.06	1.01	42.47	14.30	1.27	0.18	102.99	1.005	0.004	0.001	0.007	1.017	0.768	0.159	0.053	0.003	0.983
580	35.18	0.03	0.03	0.15	11.65	52.00	0.68	0.10	99.82	0.995	0.001	0.001	0.001	0.998	0.257	0.708	0.035	0.002	1.002
581	34.30	0.11	—	0.50	7.81	59.38	0.38	0.08	102.56	0.979	0.003	—	0.004	0.986	0.175	0.817	0.020	0.002	1.014
582	41.26	0.05	0.06	0.32	34.20	24.25	1.45	0.16	101.75	0.998	0.001	0.002	0.002	1.003	0.647	0.283	0.064	0.003	0.997
583	40.62	0.08	—	—	32.99	27.27	1.01	0.20	102.17	0.994	0.002	—	—	0.996	0.633	0.322	0.045	0.004	1.004
584	33.10	—	—	2.09	1.02	67.16	0.15	0.02	103.54	0.987	—	—	0.018	1.005	0.024	0.963	0.008	—	0.995
585	34.16	—	—	—	5.01	60.43	0.42	0.08	100.10	1.004	—	—	—	1.004	0.115	0.857	0.022	0.002	0.996
586	38.59	0.12	0.01	—	24.46	38.89	0.24	0.11	102.42	1.000	0.003	—	—	1.003	0.498	0.486	0.011	0.002	0.997
587	33.23	0.03	—	—	1.90	66.93	0.27	—	102.36	0.985	0.001	—	—	0.986	0.044	0.956	0.014	—	1.014



окруженный каймой
брейтгауптита (ан. 230);
Фотографии в отраженных
электронах

Рис. 7. Фрагменты рисунка 5.
Агрегаты 6-ого минерального ком-
плекса. Талнах, рудник Октябрь-
ский.

a — Пластинчатые кристаллы
маухерита, промежутки между
которыми выполнены брейт-
гауптитом (ан. 204);

b — Срастания таблитчатых
кристаллов брейтгауптита (ан.
200) и маухерита («М»), на
которые вырос Со-никелин (ан.
248, 249);

c — Кристаллы брейтгауптита
(ан. 304) и Sb-никелина окружены и
частично замещены маухеритом
(«М»). На них — кайма Со-герс-
дорфита (темно-серое, «Г»).
Вокруг — Sb-никелин (ан. 309),
маухерит и брейтгауптит;

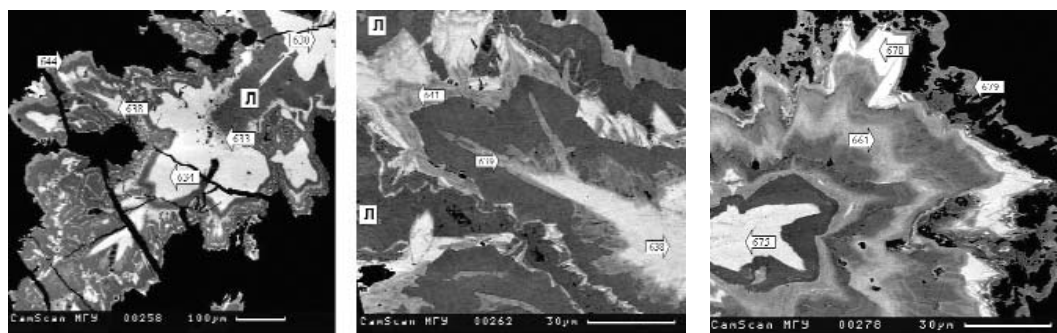
d — В центре кристалл брейт-
гауптита (ан. 304) с каймой
Sb-никелина (ан. 305). Вокруг —
Со-герсдорфит («Г»), далее —
зональные выделения Sb-никелина
(ан. 309);

e — Зональные почки Со-никелина
(ан. 213, 214) с включениями
брейтгауптита (белое). Кайма —
сернистый саффорит («С»);

f — Срастания тонко-расщеплен-
ных кристаллов брейтгауптита
(ан. 220) и Со-никелина (ан. 222,

бальтина (рис. 6а,б). На них выросли агрега-
ты кристаллов Со-никелина (ан. 242), зоны
роста которых маркированы Ni-кобальти-
ном (рис. 6а,б). Их окружают никелин с
вростками брейтгауптита и с каймой мел-
кокристаллического брейтгауптита (рис.
6б). Эти последние слагают центральные
части некоторых бобовин (рис. 6с), где на
них выросли агрегаты маухерита с мелкими
включениями брейтгауптита и с каймой
мелкозернистого брейтгауптита (рис. 6с).

Минералы ряда никелин-брейтгауптит
5-ого комплекса представлены крайними чле-
нами. Содержание кобальта в никелине V —
до 10 мас.%, серы — <0.1 мас.%.
6-ой минеральный комплекс. 6-ой ком-
плекс образуют маухерит, брейтгауптит IV,
никелин VI; характерны расщепленные кри-
сталлы никелина, обогащенного кобальтом.
Ранние образования — срастания маухерита
и брейтгауптита (рис. 7а,б), иногда с каймой
Sb-никелина. Они окружены маухеритом с
каймой Со-герсдорфита. На описанные обра-
зования выросли Sb-никелин (табл. 7, ан. 309)
и брейтгауптит (рис. 7с,д). В ряде случаев эти
последние слагают центральные части почек
(рис. 7е,ф), внешние части которых образуют
расщепленные кристаллы Со-никелина, ок-
руженные агрегатами расщепленных кри-
сталлов высокосернистого Fe-саффорита



а б с
 223). Оторочка — высокосернистый сафлорит («С»).
 Фотографии в отраженных электронах
Рис. 8. Сложно зональные агрегаты арсенидов и антимонидов. Талнах, рудник Комсомольский. а — 10-ый минеральный комплекс. Ранние — брейтгауптит (ан. 630, 634), Ni-содержащий леллингит («Л»), Sb-никелин (ан. 633) с каймой диарсенидов Ni-Fe (темно-серое). Более поздние — кристаллы брейтгауптита (ан. 638) и Sb-никелина, кайма — диарсениды Ni-Fe. Внешние зоны — Sb-никелин (ан. 644); б — Фрагмент рисунка 8 а. Кристаллы брейтгауптита (ан. 638) с каймой Sb-никелина (ан. 639). На них narосли диарсениды Ni-Fe (темно-серое), далее — Sb-никелин (ан. 641) и в различной степени мышьяковистый брейтгауптит (белое до светло-серого), леллингит (темно-серое, «Л»); с — 10-ый минеральный комплекс. Более ранний брейтгауптит (ан. 675) с каймой диарсенидов Ni-Fe. Вокруг — широкая зона в различной степени сурьмянистого никелина (ан. 661) и более позднего брейтгауптита (ан. 678). Внешняя зона — агрегат кальцита (черное) и никелина (ан. 679); д — 11-ый минеральный комплекс. Более ранние — сферолитовые агрегаты никелина (ан. 575, 576), вокруг — Sb-никелин (ан. 579). Более поздние — агрегаты брейтгауптита (в различной степени

д
 (рис. 7e,f).

Содержание кобальта в никелине VI увеличивается от центра почек к внешним зонам до 15 мас.%. Никелин VI содержит до 30 мас.% Sb, брейтгауптит практически не содержит As (табл. 7, ан. 243, 304). Рентгенограмма брейтгауптита IV: 2.83Å (8) (101); 2.565 (2) (002); 2.047 (7) (102); 1.965 (10) (110); 1.537 (6) (103); параметры элементарной ячейки: a_0 3.926(6)Å; c_0 5.143(6)Å.

7-ой минеральный комплекс. Почка 7-ого комплекса сложены диарсенидами ряда раммельсбергит-леллингит с отдельными тонкими (10–30 мкм) зонами никелина VII. Этот никелин содержит 2–5 мас.% Sb.

10-ый минеральный комплекс. 10-ый комплекс представлен сложнзональными бобовинами из множества зарождений брейтгауптита V, никелина VIII, раммельсбергита и леллингита.

Пластинчатые кристаллы безмышьяковистого брейтгауптита V первого зарождения и их крестообразные срастания обрамляет агрегат Ni-содержащего леллингита, на который narос высокосурьмянистый никелин VIII первого зарождения (рис. 8а). На этот никелин narосли крупные короткопризматические кристаллы низкомышьяковистого брейтгауптита V второго зарождения (табл. 8) с тонкой каймой диарсенидов Ni и Fe (рис. 8а).

Эти образования являются подложкой для агрегатов длиннопризматических кристаллов низкомышьяковистого брейтгауптита V третьего зарождения с рисунком зоны геометрического отбора (рис. 8а) и высокосурьмянистого никелина VIII второго зарождения с каймой диарсенидов Ni и Fe (рис. 8б).

На них narосли сложно-зональные агрегаты расщепленных кристаллов высокосурьмянистого, безсурьмянистого, Sb-никелина VIII третьего зарождения и брейтгауптита V четвертого зарождения (рис. 8б,с). В ряде случаев данные агрегаты окружены каймой никелина VIII четвертого зарождения с кальцитом (рис. 8с) или леллингитом. На них narос Sb-никелин VIII пятого зарождения (табл. 8, ан. 644) и брейтгауптит V пятого зарождения, размер кристаллов этого брейтгауптита — до 1 мм. Некоторые бобовины 10-ого комплекса окружены каймой (10–20 мкм) маухерита.

11-ый минеральный комплекс. 11-ый комплекс представлен зональными тонкорасщепленными почками и бобовинами антимонидов и арсенидов с включениями самородного серебра, ртутистого серебра, пираргирита (рис. 8д).

Центральные части почек сложены тонкорасщепленными агрегатами Sb-никелина IX с включениями серебра. Этот никелин содержит 5–7 мас.% Sb (табл. 9, ан. 575, 576). На него narос никелин, содержащий 15 мас.% Sb

и антимонидов из нормальных растворов в открытом пространстве.

Благодарности

Авторы благодарны за помощь в сборе образцов арсенидов геологам Норильского комбината Э.А. Кулагову, С.Н. Белякову, А.Н. Глотову, Е.В. Середе, В.Н. Стасенко; за помощь в проведении анализов сотрудникам лабораторий микронзондового анализа геологического факультета МГУ Н.Н. Конюковой, Н.Н. Коротаевой, Е.В. Гусевой, И.А. Брызгалову.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-05-64162).

Литература

- Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, **1981**. 234 с.
- Гоглевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, **1959**. 68 с.
- Дистлер В.В., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Балбин А.С. Арсениды, сульфоарсениды никеля, кобальта и железа Талнахского рудного поля // Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. Л.: Наука, **1975**. С. 61–74.
- Дымков Ю.М. Парагенезис минералов ураноносных жил. М.: Недра, **1985**. 100 с.
- Золотухин В.В. Базитовые пегматоиды норильских рудоносных интрузивов и проблема генезиса платиноидно-медно-никелевого оруденения норильского типа. Новосибирск: СО РАН, **1997**. 88 с.
- Изотко В.М., Вяльсов А.Н. Об ассоциации арсенидов и антимонидов никеля в рудах Талнахского месторождения // 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.
- Кулагов Э.А., Евстигнеева Т.Н. Новые никелевые минералы в рудах Норильского и Талнахского месторождений // Материалы конференции Норильских геологов. Норильск, **1971**. С. 157–158.
- Малич Н.С. Тектоническое развитие чехлы Сибирской платформы. М.: Недра, **1975**. 202 с.
- Пеков И.В. Минералы ряда никелин-брейтгауптит из Белореченского месторождения (Северный Кавказ) // ЗВМО. **1993**. Ч. 122. № 3. С. 44–49.
- Пономаренко А.И., Малов В.С. Первая находка палладиевого брейтгауптита // Докл. АН СССР, **1991**. т. 320. № 4. с. 967–970.
- Рамгор П. Рудные минералы. М.: ИЛ, **1962**. 1136 с.
- Служеникин С.Ф., Мохов Ф.В. Минералы золота и серебра в месторождениях Норильского района // Геология, генезис и вопросы освоения комплексных месторождений благородных металлов. М.: ИГЕМ РАН, **2002**. С. 326–330.
- Спиригонов Э.М., Ладыгин В.М., Кулагов Э.А., Степанов В.К., Серега Е.В., Гриценко Ю.Д. Минералогия низкоградно метаморфизованных пород и руд трапповой формации Сибирской платформы // Минералогия – основа использования комплексных руд. СПб: ВМО РАН, **2001**. С. 97–99.
- Спиригонов Э.М., Ладыгин В.М., Симонов О.Н., Кулагов Э.А., Серега Е.В., Степанов В.К. Метавулканы цеолитовой и прениит-пумпеллиитовой фации трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: МГУ, **2000**. 212 с.
- Степанов В.К., Туровцев Д.М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ. **1988**. Вып. 223. С. 86–94.
- Чвилева Т.Н., Безсмертная М.С., Спиригонов Э.М., Виноградова Р.А. Справочник – определитель рудных минералов в отраженном свете. М.: Недра, **1988**. 504 с.
- Шнейдерхен 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.
- Czarnanske G.K., Kunilov V.E., Zientek M.L., Cabri L.J., Likhachev A.P. A proton-microprobe study of magmatic sulfide ores from the Noril'sk-Talnakh district, Siberia // Canad. Mineral. **1992**. Vol. 30. P. 249–287.
- Hytonen K. Suomen Mineraalit. Geologian tutkimuskeskus. Erillisouluksaisu: **1999**. 399 s.
- Leblanc M., Cervilla F., Jedwab J. Noble metals segregation and fractionation in magmatic ores Ronda and Beni Bousera lherzolite massifs (Spain, Morocco) // Mineral. Petrol. **1990**. Vol. 42. P. 233–248.
- Schneiderhohn H. Fortschritte in der Erkenntnis sekunda r-hydrothermalmer und regenerierter Lagerstätten // Neues Jahrb. Mineral. Monat. **1953**. H. 9/10. S. 65–89.