



Научная статья
УДК 553.08

Редкие минералы благородных металлов в коллекции Горного музея: новые данные

Д.А.ПЕТРОВ , С.О.РЫЖКОВА, И.М.ГЕМБИЦКАЯ
 Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Петров Д.А., Рыжкова С.О., Гембицкая И.М. Редкие минералы благородных металлов в коллекции Горного музея: новые данные // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 493-500.
 DOI: 10.31897/PMI.2022.42

Аннотация. Современными аналитическими методами (оптическая и электронная микроскопия, рентгеновский микроанализ) проведено изучение уникальных образцов сульфидных руд Норильского рудного поля из коллекций Горного музея Санкт-Петербургского горного университета. Исследовались образцы, содержащие редкие минералы серебра и платиноидов (соболевскит, урванцевит, сперрилит, аргентопентландит, фрудит, котульскит и другие). Уточнен химический состав, размеры зерен, формы выделения и минеральные ассоциации более десяти благороднометальных минералов. Показана эффективность комбинирования различных методик электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа для изучения образцов подобного типа. Результаты работы позволили получить качественные изображения редких минералов, детализировать информацию по музейным предметам, составить их научный паспорт. Проведенные исследования показали актуальность изучения музейных предметов из известных месторождений сложного генезиса и минерального состава с целью обнаружения и описания образцов с редкими минералами.

Ключевые слова: сульфидные медно-никелевые руды; Октябрьское месторождение; Талнахское месторождение; минералы благородных металлов; Горный музей

Поступила: 12.04.2022 Принята: 25.05.2022 Онлайн: 26.07.2022 Опубликована: 26.07.2022

Введение. Норильское рудное поле является уникальным геологическим и горнопромышленным объектом, в том числе и как крупнейшее месторождение палладия на Земле. Целый ряд монографий и множество статей посвящены как геологии этого района [1], так и минералогии различных типов его руд [2, 3]. Благороднометальная минерализация сосредоточена в сульфидных медно-никелевых рудах. Главными рудными минералами в них являются пирротин, халькопирит, пентландит, кубанит, талнахит, моихукит, магнетит, а также другие сульфидные минералы – борнит, халькоzin, ковеллин, хизлевудит, миллерит, годлевскит [4]. Наряду с палладием, норильские руды богаты платиной, золотом и серебром: соотношение содержаний Ag : Au : Pd оценивается, как 20-40 : 1 : 20-50 : 5-15 [5]. Большая часть благородных металлов в норильских сульфидных рудах представлена собственными минералами, меньшая – рассеяна в сульфидах (Pd и Ag в пентландите и т.п.) [5, 6].

Норильские руды, содержащие благородные металлы, широко представлены в коллекциях Горного музея, в частности, в минералогическом собрании, которое на данный момент насчитывает более 51 000 экспонатов, отражающих разнообразие природных форм 2222 минеральных видов. Подавляющая часть этих образцов поступила в Горный музей достаточно давно (во второй половине XX в.) и нуждается в исследовании на современном уровне для критического анализа и уточнения описаний. При этом уникальные музейные образцы не могут быть разрушены или как-либо повреждены, что накладывает существенные ограничения на выбор аналитических методов. Решением этой проблемы может стать использование различных технологий электронной микроскопии и микроанализа. С внедрением высокоточных методов композиционного контраста и локального микроанализа минералов появилась возможность исследовать рудные агрегаты сложного строения

и генезиса [7, 8]. Методика использования различных режимов контраста изображения и рентгеновского микроанализа позволяет получать экспресс-информацию о составе, формах выделения и неоднородности минералов [9]. Для детального исследования были выбраны четыре образца (аншлифы) сульфидных руд из Октябрьского и Талнахского месторождений Норильского рудного района, переданные в Горный музей в 1976-1983 гг. (см. таблицу). В коллекции Горного музея «Систематическая минералогия» они представляют следующие редкие минералы: урванцевит (МГС 1176/1), талфенисит (МГС 1128/1), пугоранит (МГС 1289/1), соболевскит (МГС 1357/1).

Информация о музейных предметах (аншлифах) сульфидных руд Норильского рудного района*

Инвентарный номер	Дата поступления в музей	Передал в музей	Привязка
МГС 1176/1	15.01.1976	Н.С.Рудашевский	Месторождение Талнах, рудник «Маяк»
МГС 1128/1	31.07.1980	Н.С.Рудашевский	Октябрьское месторождение, Зальбанды сплошных халькопиритовых жил
МГС 1289/1	28.10.1982	Л.И.Емелина	Октябрьское месторождение
МГС 1357/1	05.04.1983	Л.И.Емелина	Октябрьское месторождение

*Приведены данные из книги первичной регистрации отдела минералогии.

Методология. Поскольку образцы представляют собой музейные предметы и разрушение их крайне нежелательно, методы исследований были ограничены оптической и растровой электронной микроскопией и рентгеновским микроанализом на имеющихся полированных поверхностях аншлифов. Исследования проводились в Санкт-Петербургском горном университете на кафедре минералогии, кристаллографии и петрографии (оптическая микроскопия) с привлечением лабораторной базы Центра коллективного пользования (электронная микроскопия и микроанализ).

Предварительно все аншлифы были детально изучены в отраженном свете (исследовательский оптический микроскоп Leica DM 2700). Исследование показало, что руды сложены в основном пиритом, халькопиритом, кубанитом, пентландитом, галенитом, сфалеритом и магнетитом, наряду с которыми присутствует большое количество зерен минералов, предварительно отнесенных к благороднометалльным. Многие из этих минералов не диагностируются под оптическим микроскопом из-за малого размера выделений (десятки – первые сотни микрометра), сложного характера срастаний и слабой контрастности оптических свойств. Участки аншлифов с такими минералами были выбраны для детального исследования под электронным микроскопом.

Так как исследуемые образцы являются непроводящими материалами, было выполнено напыление аншлифов тонким слоем углерода (не более 15 нм). Напыление осуществлялось с помощью вакуумного поста JEE-420 (Jeol, Япония). Опыт предыдущих работ показал, что такой слой напыления не искажает морфологические особенности образца и безопасен для сохранности экспонатов при исследовании на растровых электронных микроскопах.

Изучение образцов методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа проводилось с использованием двух микроскопов (Jeol, Япония) с различными источниками эмиссии электронов: вольфрамовым катодом (JSM-6460LV) и катодом LaB₆ (ЛВ-4500) с полупроводниковыми детекторами фирмы OXFORD.

Актуальным является использование РЭМ «JSM-6460LV», обладающего рядом преимуществ: пятиосный моторизованный столик образов; полупроводниковый детектор от В до U, работающий при невысоких токах электронного пучка; режим низкого вакуума, позволяющий исследовать диэлектрические или плохо напыленные участки образца (микротрещины и поры); наличие высококонтрастных режимов SEI, COMPO, TOPO, Shadow, обеспечивающих экспресс анализ морфологии и неоднородности минералов в сложных агрегатах; одновременное площадное картирование и линейное сканирование в рентгеновских лучах по любой выборке элементов.

Двулучевая система ЛВ-4500 обеспечивает, помимо указанных характеристик, более высокое разрешение, так как используется катод с LaB₆, а большее рабочее расстояние (18 мм) дает более полный обзор образца. Использование ионной пушки (Ga) позволяет корректировать качество поверхности, снимая тонкий слой пленки окисления (10-15 нм).



Исследование химических особенностей образцов в точке (3 мкм) производилось с использованием EDS-спектрометра в диапазоне элементов от С до U. С помощью пакета программ фирмы OXFORD для анализа рентгеновского спектра, разрешения сложных наложений рентгеновских линий и введения поправок при количественных расчетах подобраны оптимальные условия измерения образцов и расчета их состава.

В зависимости от размера минеральных выделений варьировалось ускоряющее напряжение от 10 до 25 кВ, ток на образце составлял от 10^{-10} до 10^{-8} А. Наилучшее разрешение изображения достигалось за счет изменения указанных параметров и использования катода LaB₆ (помимо W-ка-тода). Рабочее расстояние соответствовало стандартному (10 мм для JSM-6460 и 18 мм для JIB-4500) для получения корректных результатов рентгеновского микроанализа.

Обсуждение. В результате исследования в изученных образцах выявлено более десяти минералов благородных металлов:

- минералы палладия – урванцевит, соболевскит, фрудит, котульскит, паоловит, сопчеит, кабриит;
- минералы платины – сперрилит, мончейт;
- минералы серебра – самородное серебро, гессит, аргентопентландит, сопчеит.

Распределены благороднометалльные минералы в руде крайне неравномерно, характерны их сложные срастания между собой и с главными сульфидными минералами (в первую очередь – галенитом, пентландитом и халькопиритом). Большинство минералов не были отмечены в имеющемся музейном описании в качестве отдельных единиц хранения. Вместе с тем не был обнаружен талфеницит в образце МГС 1128/1. Приведена краткая информация о каждом из обнаруженных минеральных видов и описание его выделений в изученных образцах. Теоретические формулы минералов даны по [10], обозначения минералов на фотографиях – согласно [11].

Самородное серебро Ag, Au. Наиболее распространенный минерал серебра во всех исследованных образцах. Представлен зернами неправильной формы, часто вытянутыми, размером от 30-50 до 150 мкм. Как правило, находится в галените или в срастаниях с ним; в ассоциации с галенитом и сфalerитом в халькопирите, а также в сложных срастаниях с гесситом (рис.1), мончейтом, котульскимитом.

Между изученными образцами отмечены значительные вариации содержаний Ag и Au в составе самородного серебра, мас.%: Ag 52,95-100,00, Au 0-47,05. Чистое беспримесное серебро (близко к 100 мас.% Ag) встречено в сростках с галенитом и в галенит-сфалеритовых прожилках в пентландитовой руде (образец МГС 1357/1). В ассоциации с висмутидами палладия (соболевскитом, урванцевитом, фрудитом в образце МГС 1176/1) содержание Ag снижается до 78-88 %, а Au, соответственно, повышается до 12-22 %. Внутри прожилков гессита в галените МГС 1128/1 содержится 53-57 % Ag и 43-47 % Au (колебания состава хорошо заметны в изменении яркости на высококонтрастных BSE-изображениях, например, рис.1). В последнем случае в отраженном свете минерал приобретает отчетливый золотистый цвет; тем не менее, согласно существующим представлениям [12], все проанализированные твердые растворы относятся к самородному серебру.

Гессит Ag_2Te . Один из распространенных теллуридов серебра [12]. Встречен в халькопиритовой руде, ассоциирует с галенитом, встречается в виде рассеянных включений размером 10-15 мкм. Представлен зернами округлой или вытянутой (овальной) формы размером 30-50 мкм. Помимо галенита, ассоциирует с самородным серебром (рис.1), мончейтом и котульскимитом. Химический состав гессита, мас.%: Ag 61,46-64,52, Te 35,48-38,54, примесей не обнаружено.

Аргентопентландит AgFe_8S_8 . Впервые выделен как отдельный минеральный вид в рудах Норильского района в 1977 г. [13], описывался также в месторождениях СССР,

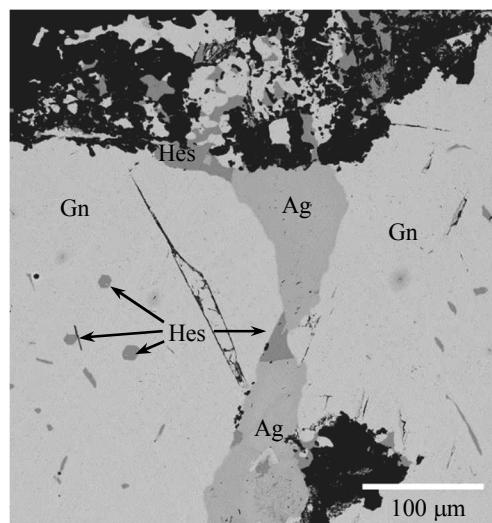


Рис.1. Прожилок самородного серебра (Ag) с гесситом (Hes) в галените (Gn).

Изображение в режиме COMPO

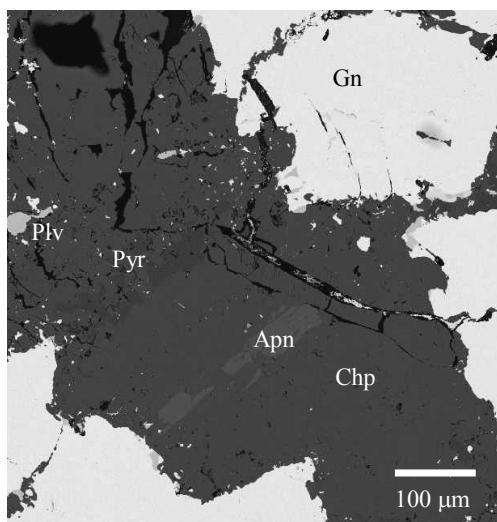


Рис.2. Аргентопентландит в халькопирит (Chp)-галенитовой (Gn) руде с пирротином (Рут) и паоловитом (Plv).
Изображение в режиме COMPO

Финляндии [14], Канады [15], Чехии [16] и других стран как обогащенный серебром пентландит либо отдельный минеральный вид. Аргентопентландит представлен пластинчатыми зернами и их агрегатами размером 100-150 мкм в халькопиритовой руде вблизи зерен галенита, а также зернами неправильной формы размером 20-30 мкм в пентландите (рис.2).

Химические составы аргентопентландита, мас.%: Ag 12,14-15,42, Fe 28,72-39,01, S 32,81-37,21, Ni 15,66-18,66, в одном зерне установлена примесь Cu – 0,71.

Висмутиды палладия. Представлены сразу несколькими минеральными видами: соболевскитом, фрудитом, урванцевитом и, возможно, поляритом. Зачастую они образуют сложные срастания друг с другом, заключенные в галените. Для точного отличия висмутидов палладия друг от друга требуется сопоставление данных оптической и электронной микроскопии.

Фрудит $PdBi_2$ (моноклинный). Впервые описан на месторождении Садбери в Канаде [17, 18], впоследствии найден на аналогичных месторождениях в России [4], Германии [19], Южной Африке, США и других странах. В изученных образцах встречен в срастаниях с урванцевитом, соболевскитом, самородным серебром, заключенным внутри галенита. В этих срастаниях составляет центральную часть (рис.3) с размерами выделений до 300 × 500 мкм. Химический состав фрудита, мас.%: Pd 24,26-25,57, Bi 74,43-75,74.

Урванцевит $PdBi_2$ (тетрагональный). Распространен в мире значительно реже фрудита и соболевскита. Впервые описан в рудах Талнахского месторождения в 1976 г. [20], впоследствии найден в Карелии и Иркутской обл. [21].

В изученных образцах образует срастания с фрудитом, соболевскитом и самородным серебром внутри галенита. Размер зерен урванцевита 50-100 мкм. Химический состав, мас.%: Pd 24,30-24,36, Bi 61,27-61,85, Pb 13,85-14,37. По химическому составу урванцевит отличается от фрудита заметной примесью свинца, но, несмотря на это, плохо отличается от него в композиционном контрасте под электронным микроскопом. Напротив, в отраженном свете под оптическим микроскопом он достаточно хорошо отличим от фрудита по более темной окраске и заметному двутражению.

Соболевскит $PdBi$ (гексагональный). Впервые выделен как отдельный минеральный вид в норильских рудах в 1975 г. [22]. Впоследствии минерал был обнаружен в месторождениях и проявлениях Северного Прибайкалья [23], Карелии [24], Кольского полуострова [25], а за пределами России – в Канаде [26], Греции [27] и ряде других стран (всего более 30 находок в мире).

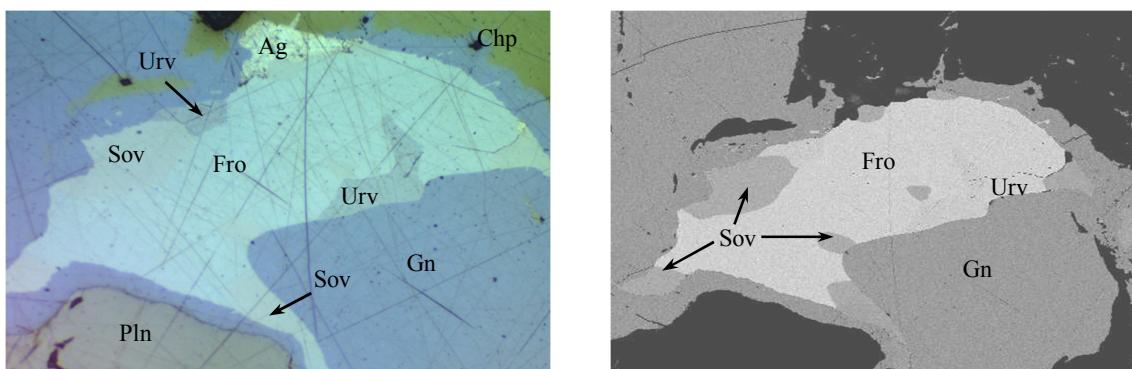


Рис.3. Типичный сросток висмутидов палладия в хальпирит-галенит-пентландитовой руде.

Слева – в отраженном свете, справа – в режиме COMPO
Ag – самородное серебро, Urv – урванцевит, Fro – фрудит, Sov – соболевскит, Chp – халькопирит,
Pln – пентландит, Gn – галенит. Ширина изображения 1 мм

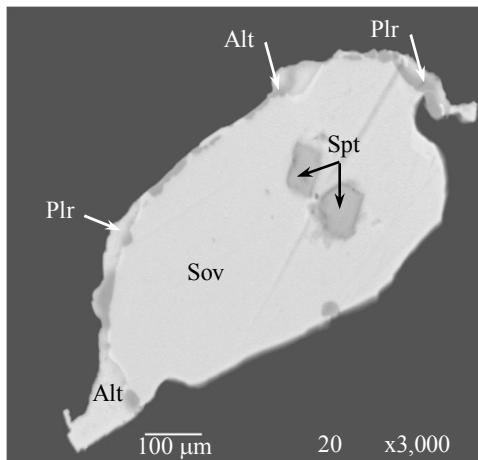


Рис.4. Зерно соболевскита (Sov) с включениями сперрилита (Spt) и каймой из алтита (Alt) и, предположительно, полярита (Plr). Изображение в режиме COMPO

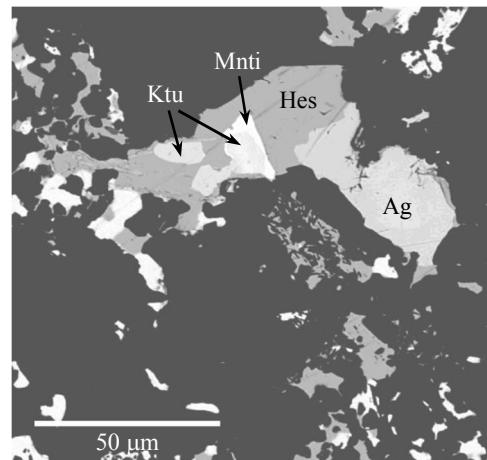


Рис.5. Сростки котульского (Ktu), мончелита (Mnti), гессита (Hes) и самородного серебра (Ag) в халькопирит-галенитовой руде. Изображение в режиме COMPO

В исследованных образцах присутствуют зерна соболевскита разной формы и размера. В образце 1176/1 соболевскит найден в описанных выше срастаниях с фрудитом и урванцевитом, где он приурочен к границам с галенитом. Размер выделений соболевскита 50-100 мкм. В отличие от урванцевита, соболевскит слабо отличается от фрудита в отраженном свете, зато контрастен с ним в BSE-изображениях за счет меньшего среднего атомного номера.

В образце 1357/1 на границе магнетита и кубанита найдено небольшое (30 мкм) зерно соболевскита с включениями сперрилита в центральной части (рис.4). Форма зерна приближена к овальной с неровными краями. Зерно окружено тонкой (3-5 мкм) каймой, состоящей из алтита ($PbTe$) и, предположительно, таймырита и полярита.

Химический состав соболевскита, мас.%: Pd 35,89-40,31, Bi 59,69-61,66; в зерне из обр. 1357/1 отмечена примесь Te – 3,76 мас.%.

Полярит $PdBi$ (ромбический). Впервые описан в рудах Октябрьского месторождения Норильска в 1969 г. [28], к настоящему моменту известен примерно в десяти месторождениях и проявлениях во всем мире. Отмечен в краевых частях зерна описанного выше зерна соболевскита, в виде каймы толщиной до 5 мкм. Из-за малой толщины каймы точная диагностика по химическому составу затруднена. По составу полярит отличается от соболевскита заметной примесью свинца.

Химический состав полярита, мас.%: Pd 35,80, Bi 49,28, Pb 14,92, Pd 36,55, Bi 44,59, Pb 18,87; Pd 36,49, Bi 56,48.

Сперрилит $PtAs_2$. Один из распространенных минералов платины. Встречен в центральной части описанного зерна соболевскита в виде двух идиоморфных (близких к октаэдрическим?) зерен размером около 3-5 мкм каждое (рис.4).

Химические составы зерен сперрилита, мас.%: Pt 57,60, As 42,40 и Pt 56,36, As 42,55, Fe 1,09.

Мончейт $PtTe_2$ и котульский $PdTe$. Впервые оба минерала описаны в рудах Мончегорского месторождения в 1963 г. [29]. Впоследствии найдены во многих платинометальных месторождениях и проявлениях России, Бразилии [30, 31], Канады [18, 32], Японии [33], Индии [34].

В исследованных образцах оба минерала встречены в изометричных зернах неправильной формы размером 10-20 мкм в сростках с гесситом и самородным серебром, причем мончейт может нарастать в виде каймы на зерна котульского (рис.5). Котульский также отмечен в ассоциации с галенитом, паоловитом и сопчеитом (рис.6).

Химические составы мончейита, мас.%: Pt 42,54, Te 42,61, Bi 14,85 и Pt 42,50, Te 50,58, Bi 6,91. Химический состав котульского, мас.%: Pd 37,70-43,58, Te 27,53-29,70, Bi 25,37-30,81, в одном зерне отмечена Pt – 7,23 мас.%.

Паоловит Pd_2Sn . Впервые описан в рудах Октябрьского месторождения Норильска в 1974 г. [35]. В настоящее время встречен в ряде месторождений России, Канады, ЮАР и некоторых других стран.



Рис.6. Сросток сопчеита (Sop), паоловита (Plv), котульскита (Ktu) и галенита (Gn) в халькопирите (Chp). Изображение в режиме COMPO. Ширина изображения 50 мкм

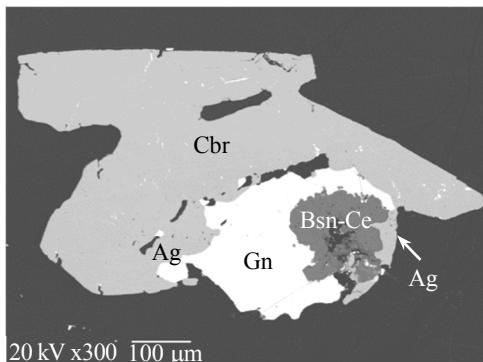


Рис.7. Сросток кабриита (Cbr) с галенитом (Gn), самородным серебром (Ag) и бастнезитом-Се (Bsn-Ce). Изображение в режиме COMPO

образований, присутствуя в зернах небольшого размера. Многие из перечисленных минералов (висмутиды палладия, теллуриды палладия и платины, интерметаллиды золота – серебра), будучи близки между собой по химическому составу и (или) оптическим свойствам, далеко не всегда обнаруживаются при рутинных исследованиях в оптическом или электронном микроскопе. Предлагаются различные подходы для исследования подобных объектов [42]. Детальное изучение сложных рудных агрегатов с применением высокоточных методов композиционного контраста и локального микроанализа позволяет решить эту проблему и расширить наши знания о минеральном составе как уже известных [43, 44], так и вновь открытых месторождений благородных металлов [45, 46].

В результате проведенного исследования были получены качественные изображения редких минералов, позволяющие детализировать информацию по музеиным предметам и составить их научный паспорт. Это дает возможность использовать указанные аншлифы с редкими минералами и другие предметы из коллекций Горного музея в качестве учебно-практического материала для повышения качества обучения студентов университета. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования методов извлечения благородных металлов из медно-никелевых руд [47, 48], в том числе и с использованием новейших технологий обогащения [49, 50].

Встречен в халькопирит-галенитовой руде, где ассоциирует с гесситом, сопчеитом, пирротином, аргентопентландитом, образуя полиминеральные сростки и отдельные зерна (см. рис.2, 6). Размеры выделений от 5 до 30 мкм.

Химический состав паоловита, мас.%: Pd 66,72-67,95, Sn 29,61-33,28; в одном зерне отмечена примесь Pt – 2,44 мас.%.

Сопчеит $\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$. Открыт в медно-никелевых рудах Мончегорского месторождения в 1982 г. [36]. К настоящему времени известен в нескольких месторождениях России [25, 37], ЮАР [38], Танзании [39] и ряда других стран. Ассоциирует с паоловитом, котульскимитом, гесситом в галенит-халькопиритовой руде (рис.6). Зерна изометричной формы, размером 10-40 мкм.

Химический состав сопчеита, мас.%: Ag 27,96-34,12, Pd 31,81-38,87, Te 27,22-31,92, в двух зернах отмечена примесь Sn – 5,27 и 6,85 мас.% (возможно, из-за присутствия рядом паоловита).

Кабриит Pd_2SnCu . Впервые описан в рудах Норильского района в 1983 г. [40], впоследствии найден в нескольких месторождениях России, Канады, США и ЮАР [21, 41]. В изученных образцах обнаружен в единственном зерне неправильной формы размером 250-300 мкм (рис.7), срастающимся с высокопробным самородным серебром, галенитом и бастнезитом-Се в халькопирите.

Химический состав кабриита, мас.%: Pd 52,20, Sn 29,17, Cu 13,92, Pt 4,71.

Выводы. Полученные данные имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. В коллекциях Горного музея в настоящее время отсутствуют образцы с редкими минералами следующих минеральных видов: таймырит, паоловит, сопчеит, фрудит, сперрилит, кабриит. Эти минералы не выделены в коллекции «Систематическая минералогия» как самостоятельные единицы хранения, они являются составной частью сложных полиминеральных



ЛИТЕРАТУРА

1. Геология Норильской металлогенической провинции: к 65-летию Норильскгеологии / ПАО «ГМК “Норильский никель”». М.: МАКС Пресс, 2020. 524 с.
2. Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН, 26-29 сентября 2010. Апатиты: Изд-во К & М, 2010. С. 143-171.
3. Barkov A.Y., Nikulin I.I., Nikiforov A.A. et al. Atypical Mineralization Involving Pd-Pt, Au-Ag, REE, Y, Zr, Th, U, and Cl-F in the Oktyabrsky Deposit, Norilsk Complex, Russia // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 11. № 1193. DOI: 10.3390/min11111193
4. Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Serova A.A. et al. Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Norilsk sulfide ores // Geology of Ore Deposits. 2015. Vol. 57. Iss. 5. P. 402-432. DOI: 10.1134/S1075701515050062
5. Годлевский М.Н. Разин Л.В., Конкина О.М. Золотоносность дифференцированных интрузивов норильского типа // Труды ЦНИГРИ. 1970. Вып. 87. С. 42-57.
6. Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Norilsk deposits, Russia // Mineralium Deposita. 2015. Vol. 50. P. 465-492. DOI: 10.1007/s00126-014-0543-2
7. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Структурно-химическая неоднородность природных кристаллов и микрогеохимическое направление в онтогенезе минералов // Записки Российского минералогического общества. 2012. Т. 141. № 1. С. 3-21.
8. Марин Ю.Б. О минералогических исследованиях и использовании минералогической информации при решении проблем петро- и рудогенеза // Записки Российского минералогического общества. 2020. Т. 149. № 4. С. 1-15. DOI: 10.31857/S0869605520040048
9. Гембцикай И. М., Гвоздецкая М.В. Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 401-407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9
10. Кривовичев В.Г. Минеральные виды. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета, 2021. 600 с.
11. Warr L.N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85. Iss. 3. P. 291-320. DOI: 10.1180/mgm.2021.43
12. Пальянова Г.А. Минералы золота и серебра в сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 5. С. 426-449. DOI: 10.31857/S0016777020050056
13. Рудашевский Н.С., Митенков Г.А., Карпенков А.М., Шишкин Н.И. Серебросодержащий пентландит $\text{Ag}(\text{Fe}, \text{Ni})_8\text{S}_8$ – самостоятельный минеральный вид аргентопентландит // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1977. № 6. С. 688-691.
14. Kalinin A.A. Tellurium and Selenium Mineralogy of Gold Deposits in Northern Fennoscandia // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 6. P. 574. DOI: 10.3390/min11060574
15. Barkov A.Y., Laflamme J.H.G., Cabri L.J., Martin R.F. Platinum-group minerals from the Wellgreen Cu-Ni-PGE deposit, Yukon, Canada // Canadian Mineralogist. 2002. Vol. 40. № 2. P. 651-669. DOI: 10.2113/gscanmin.40.2.651
16. Sejkora J., Litočleb J., Novak M. et al. Nickel-(Bi, Ag) sulphide mineralization from NYF Vepice pegmatite, Milevsko pluton, southern Bohemia (Czech Republic)-a reflection of the parental granite chemistry // Journal of Geosciences. 2020. Vol. 65. Iss. 3. P. 187-199. DOI: 10.3190/jgeosci.310
17. Hawley J.E., Berry L.G. Michenerite and froodite, palladium bismuth minerals // The Canadian Mineralogist. 1958. Vol. 6. № 2. P. 200-209.
18. Good D.J., Cabri L.J., Ames D.E. PGM facies variations for Cu-PGE deposits in the Coldwell Alkaline Complex, Ontario, Canada // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 90. P. 748-771. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.04.028
19. Sandmann D., Gutzmer J. Nature and distribution of PGE mineralisation in gabbroic rocks of the Lusatian Block, Saxony, Germany // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. 2015. Vol. 166. Iss. 1. P. 35-53. DOI: 10.1127/1860-1804/2014/0083
20. Рудашевский Н.С., Макаров В.Н., Медведева Е.М. и др. Уравнцевит, $\text{Pd}(\text{Bi}, \text{Pb})_2$, новый минерал в системе Pd-Bi-Pb // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1976. № 6. С. 704-709.
21. Shvedov G.I., Barkov A.Y. Primary and alteration assemblages of platinum-group minerals from the Ognit complex, Irkutskaya oblast, Eastern Sayans, Russia // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry. 2017. Vol. 194. № 1. P. 35-48. DOI: 10.1127/njma/2016/0038
22. Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. Новый висмутид палладия – соболевскит – и номенклатура минералов системы PdBi – PdTe – PdSb // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1975. № 5. С. 568-579.
23. Kislov E.V., Khudyakova L.I. Yoko-Dovyten Layered Massif: Composition, Mineralization, Overburden and Dump Rock Utilization // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 8. № 682. DOI: 10.3390/min10080682
24. Lavrov O.B., Kuleshevich L.V. Platinoids in the Kaalamo Differentiated Massif in the Northern Ladoga Region, Karelia, Russia // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59. Iss. 7. P. 632-641. DOI: 10.1134/S1075701517070066
25. Groshev N.Y., Rundkvist T.V., Karykowski B.T. et al. Low-Sulfide Platinum–Palladium Deposits of the Paleoproterozoic Fedorova–Pana Layered Complex, Kola Region, Russia // Minerals. 2019. Vol. 9. Iss. 12. № 764. DOI: 10.3390/min9120764
26. Campos-Alvarez N.O., Samson I.M., Fryer B.J. The roles of magmatic and hydrothermal processes in PGE mineralization, Ferguson Lake deposit, Nunavut, Canada // Mineralium Deposita. 2012. Vol. 47. Iss. 4. P. 441-465. DOI: 10.1007/s00126-011-0385-0
27. McFall K.A., Naden J., Roberts S. Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 99. P. 344-364. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.06.014
28. Генкин А.Д., Евстигнеева Т.Л., Тронева Н.В., Вяльсов Л.Н. Полярит, $\text{Pd}(\text{Pb}, \text{Bi})$ – новый минерал из медно-никелевых сульфидных руд // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1969. № 6. С. 708-715.
29. Генкин А.Д., Журавлев Н.Н., Смирнова Е.М. Мончейт и котульскит – новые минералы и состав майченерита // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1963. № 1. С. 33-50.

30. Garuti G., Zaccarini F., Proenza J.A. et al. Platinum-group minerals in chromitites of the Niquelândia layered intrusion (Central Goias, Brazil): Their magmatic origin and low-temperature reworking during serpentinization and lateritic weathering // Minerals. 2012. Vol. 2. Iss. 4. P. 365-384. DOI: 10.3390/min2040365
31. Mota-e-Silva J., Prichard H.M., Suárez S. et al. Supergene alteration of platinum-group minerals and formation of Pd-Cu-O and Pd-I-O compounds in the Limoeiro Ni-Cu-(PGE) deposit, Brazil // The Canadian Mineralogist. 2016. Vol. 54. № 3. P. 755-778. DOI: 10.3749/canmin.1500049
32. Ford F.D., Wecholaz C.R., Lee A. Predicting process outcomes for Sudbury platinum-group minerals using grade-recovery modeling from mineral liberation analyzer (MLA) data // The Canadian Mineralogist. 2011. Vol. 49. № 6. P. 1627-1642. DOI: 10.3749/canmin.49.6.1627
33. Nishio-Hamane D., Tanaka T., Shinmachi T. Minakawaite and platinum-group minerals in the placer from the clinopyroxenite area in serpentinite mélange of Kurosegawa belt, Kumamoto Prefecture, Japan // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2019. Vol. 114. № 5. P. 252-262. DOI: 10.2465/jmps.190717
34. Dora M., Singh H., Kundu A. et al. Tsumoite (BiTe) and associated Ni-PGE mineralization from Gondpipri mafic-ultramafic complex, Bastar Craton, Central India: mineralogy and genetic significance // Open Geosciences. 2014. Vol. 6. Iss. 4. P. 506-517. DOI: 10.2478/s13533-012-0185-9
35. Генкин А.Д., Евстигнеева Т.Л., Вялсов Л.Н. и др. Паоловит Pd_2Sn – новый минерал из медно-никелевых сульфидных руд // Геология рудных месторождений. 1974. Т. 16. С. 98-103.
36. Орсоев Д.А., Реженова С.А., Богданова А.Н. Сопченит $Ag_4Pd_3Te_4$ – новый минерал из медно-никелевых руд Мончегорского plutона // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1982. № 1. С. 114-117.
37. Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S. et al. Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 94. P. 239-260. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.01.025
38. McCreesh M.J., Yudovskaya M.A., Kinnaird J.A., Reinke C. Platinum-group minerals of the F and T zones, Waterberg Project, far northern Bushveld Complex: implication for the formation of the PGE mineralization // Mineralogical Magazine. 2018. Vol. 82. № 3. P. 539-575. DOI: 10.1180/mgm.2018.83
39. Wilhelmij H.R., Cabri L.J. Platinum mineralization in the Kapalagulu Intrusion, western Tanzania // Mineralium Deposita. 2016. Vol. 51. № 3. P. 343-367. DOI: 10.1007/s00126-015-0603-2
40. Estigneeva T.L., Genkin A.D. Cabriite, Pd_2SnCu , a new mineral species in the mineral group of palladium, tin and copper compounds // The Canadian Mineralogist. 1983. Vol. 21. P. 481-487.
41. Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Damdinov B.B. et al. Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoi and Khara-Nur areas, East Sayan) // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. Iss. 2. P. 259-272. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.01.010
42. Толкунова А.В., Дурягина А.М., Таловина И.В. Применение ПО Thixomet и компьютерной рентгеновской микротомографии при изучении сульфидных медно-никелевых руд // Металлогенез древних и современных океанов – 2020. Материалы 26-й научной молодежной школы им. профессора В.В.Зайцева. Миасс: Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 2020. С. 257-260.
43. Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Козлов А.В. и др. Морфология, состав и онтогенез минералов платиновых металлов в хромититах зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 1. С. 60-83. DOI: 10.15372/GiG2019089
44. Козлов А.В., Михайлов В.В., Степанов С.Ю. Генетическая интерпретация срастаний рудных минералов в амфиболовых габбро Серебрянского Камня, Северный Урал // Металлогенез древних и современных океанов – 2020. Материалы 26-й научной молодежной школы им. профессора В.В.Зайцева. Миасс: Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 2020. С. 187-191.
45. Palamarchuk R.S., Stepanov S.Y., Zolotarev A.A. Platinum-group minerals from the Malaya Kamenushka River placer, Middle Urals, Russia // Mineralogical Magazine. 2020. Vol. 84. Iss 6. P. 900-912. DOI: 10.1180/mgm.2020.87
46. Mikhailov V.V., Stepanov S.Y., Kozlov A.V. et al. New Copper–Precious Metal Occurrence in Gabbro of the Serebryansky Kamen Massif, Ural Platinum Belt, Northern Urals // Geology of Ore Deposits. 2021. Vol. 63. P. 528-555. DOI: 10.1134/S1075701521060040
47. Александрова Т.Н., Орлова А.В., Таранов В.А. Современное состояние переработки медных руд (обзор) // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. № 3. С. 4-14. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-4-14
48. Александрова Т. Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462-473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9
49. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 851. DOI: 10.3390/min11080851
50. Хайнасова Т. С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 47-54. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.47

Авторы: Д.А.Петров, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Petrov_DA@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-1577-6413 (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.О.Рыжкова, канд. геол.-минерал. наук, заместитель директора Горного музея, https://orcid.org/ 0000-0002-0589-5515 (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), И.М.Гембицкая, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-0996-4098 (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.