

Л. В. РАЗИН

**МИНЕРАЛЫ — ПРИРОДНЫЕ СПЛАВЫ ЗОЛОТА И МЕДИ
В РУДАХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НОРИЛЬСКОГО ТИПА**

В комплексных сульфидных рудах месторождений норильского типа в последнее время нами обнаружены четыре минерала, представляющие собой природные сплавы золота и меди. Первые находки были сделаны в рудном концентрате и в аншлифах вкрапленных руд пикритовых и такситовых габбро-долеритов Норильского месторождения. В них были найдены палладисто-медистый электрум и природный твердый раствор меди, серебра, палладия и родия в золоте (Разин, Боришанская, 1970), названный впоследствии палладисто-родистым аргентокупроауритом (Разин, Юркина, 1971). Вскоре аргентокупроаурит был обнаружен в рудах Талнахского месторождения и описан как твердый раствор $Au_3Cu_1Ag_1$ (Разин, Бегизов, 1973). Ранее в том же месторождении установлено природное интерметаллическое соединение золота, меди и палладия — палладиевый купроаурит (Разин и др., 1971), который в честь выдающегося исследователя месторождений золота и платины члена-корреспондента АН СССР И. С. Рожкова назван рожковитом (*rozhkovite*)¹. Сейчас этот минерал встречен также в рудах Октябрьского месторождения (Разин, Бегизов, 1973).

В процессе минераграфического изучения аншлифов талнахских руд найдем пропускавшийся прежде минерал — природный твердый раствор золота и палладия в меди с идеализированной формулой $Cu_{1,5}Au_1Pd_{0,2}$ (Разин, Бегизов, 1973). По главным минералообразующим элементам — золоту, превалирующей меди и примеси палладия — этот минерал может быть назван палладистым аурупроитом.

**Описание минералов золота и меди из месторождений
норильского типа**

Химизм. Исследования методом локального количественного микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроанализаторе JXA-3A фирмы JEOL (Япония), проведенные в ВИМС², позволили установить, что общей спецификой химического состава описываемых минералов является абсолютное весовое преобладание в них золота над всеми остальными элементами, вместе взятыми (Au всегда более 50 вес.%, см. табл. 1). Однако при этом золото не во всех рассматриваемых минералах — главный минералообразующий элемент: в ауру-

¹ Рассмотрено и утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциацией 15 мая 1970 г.

Таблица 1

Химический состав природных сплавов золота и меди (по данным локального количественного микрорентгеноспектрального анализа, в вес. %)

Номера образцов	Формула минерала (идеализированная)	Месторождение	Au	Cu	Ag	Pd	Примеси	Сумма
1	Электрум палладисто-медистый: $Au_{43}Ag_{40}Cu_{11}Pd_6$	Норильск	58,4	4,7	29,2	4,4	Rh — 1,5; Pt — 0,9; Pb, Bi — He обн.	99,1
2	$Au_{45}Ag_{37}Cu_{12}Pd_6$	То же	63,0	5,2	28,7	4,3	Rh — 1,4; Pt — 0,8	103,4
3	Аргентокупроаурит палладисто-родистый * $Au_{60}Cu_{21}Ag_{17}Rh_6Pd_6$	Норильск	67,7	9,2	12,8	4,2	Rh — 4,3; Pb — 1,6; Pt — 0,9; Bi — He обн.	100,7
4	Аргентокупроаурит * $Au_{47}Ag_{26}Cu_{24}Pd_3$	Талнах	66,5	11,2	19,4	2,2	Sn — 0,5; Rh, Pt, Bi — He обн.	99,8
5	Рожковит палладиевый: $(Cu, Pd)_{8-x}Au_2$	Талнах	65,6	23,0	0,6	7,1	Rh — 3,4; Ni — 0,15; Bi — 0,6; Pb, Sb — He обн.	100,45
6	То же	То же	60,8	23,4	0,6	8,6	Pt — 1,5; Bi — 0,5; Rh, Sn, Sb, As, Te — He обн.	99,9
7—7	Аурокупроит палладисто-серебристый *: $Cu_{51}Au_{34}Ag_8Pd_7$	Талнах	57,5	26,8	8,3	5,7	Pt — 3,8; Bi — 0,8; Rh, Sn, Sb — He обн.	102,9
8	Аурокупроит палладистый *: $Cu_{53}Au_{36}Pd_9$	Талнах	61,6	28,4	0,9	7,7	Pt — 2,3; Rh — 1,9; Bi — 0,6; Pb — He обн.	103,4
9	$Cu_{63}Au_{39}Pd_8$	То же	64,5	28,0	He обн.	6,9	Pt, Rh, Ni, Bi, Pb, Sn — He обн.	99,4

* Химические разновидности минерала устанавливаются лишь по результатам изучения их состава.

Примечание. Анализы выполнены в ВИМС'е К. В. Юркиной и Л. С. Дубакиной на электронном микроанализаторе JXA-3A (Япония). Приведены среднеарифметические значения по 5—8 точкам исследования каждого образца. Эталоны — чистые металлы, на Pb — галенит. Точность определений $\pm 3\%$ отн. Методику расчета результатов см. Разин и др. (1971).

купроите и рожковите таковым является медь (табл. 7). Минералообразующее значение она имеет и в двух других рассматриваемых минералах — палладисто-родистом аргентокупроаурите и палладисто-медистом электруме, содержание меди в которых не бывает ниже 10 ат.%. В последних двух минералах основным минералообразующим элементом является также серебро (см. табл. 1, 7). Во всех четырех рассматриваемых минералах присутствует палладий, который всегда остается примесным элементом (2,2—8,6 вес.%). В качестве примеси часто присутствуют также родий (максимум до 4,3 вес.%) и платина (до 3,8 вес.%). При содержании этих элементов от 5 до 10 ат.% к названию минералов добавляются определения: «палладистый» и «родистый» — для природных твердых растворов (электрума, аргентокупроаурита, аурупроита) и «палладиевый» — для интерметаллических соединений (рожковита).

В палладистом аурупроите и палладиевом рожковите Талнахского месторождения довольно обычна примесь висмута (0,5—0,8 вес.%). В единичных образцах палладисто-родистого аргентокупроаурита установлены примеси свинца (1,6 вес.% — Норильское месторождение) и олова (0,5 вес.%, Талнахское месторождение). В одном из образцов палладиевого рожковита Талнахского месторождения обнаружена малая примесь никеля (0,15%).

Состав изученных минералов золота и меди переменен. В палладисто-медистом электруме отмечены колебания в содержании золота — 53,7—63,0 вес.%, меди — 4,5—5,2%, серебра — 22,7—29,8% и т. д. (см. табл. 1). В палладистом аргентокупроаурите для золота вариации менее существенные — 66,5—67,7 вес.%, а для меди, серебра, палладия и родия — более значительные: соответственно 9,2—11,2%, 12,8—19,4%, 2,2—4,2%, не обн. — 4,3%. В палладиевом рожковите содержание золота и палладия особенно изменчиво: 60,8—65,6 и 7,1—8,6%. В палладистом аурупроите варьирует концентрация золота 57,5—63,5, меди — 26,8—28,4, серебра — не обн. — 8,3%, палладия — 5,7—7,7%, платины — не обн. — 3,8%. Характеризуемые минералы можно разместить в следующий ряд возрастания концентрации меди: палладисто-медистый электрум → палладисто-родистый аргентокупроаурит → собственно аргентокупроаурит → палладиевый рожковит → палладистый аурупроит (см. табл. 1). Примечательно, что для членов этого ряда в целом отмечается обратная зависимость между содержанием меди и серебра. Модификацию этого ряда представляет распределение палладия в описываемых минералах: концентрация данного платиноида увеличивается от существенно серебряно-золотых к существенно золото-медным природным сплавам, а именно — от палладистого аргентокупроаурита (с 2,2—4,2 вес.% палладия) и палладисто-медистого электрума (4,3—4,5 палладия) к палладистому аурупроиту (5,7—7,7% палладия) и палладиевому рожковиту (7,1—8,6% палладия).

Кристаллохимия. Кристаллохимические особенности мелких, зачастую микроскопических выделений рассматриваемых минералов золота и меди, имеющих в основном неправильную форму и находящихся в тесном срастании с другими минералами благородных металлов и рудообразующими сульфидами, не могли быть изучены никаким иным способом, кроме рентгеновского исследования тончайшей мономинеральной стружки. Эта стружка извлекалась прицельным выщарпыванием на приборе ПМТ-3, закатывалась в шарик из резинового клея и в таком виде подвергалась съемке методом Дебая-Шеррера.

Проведенные рентгеновские исследования показали, что все отражения на рентгенограмме палладисто-медистого электрума имеют нечетные или же четные индексы, указывающие на гранецентрированную кубическую решетку этого минерала, свойственную также всем минералам групп самородного золота, самородного серебра и самородной платины (см. табл. 2). С учетом полной аналогии с последними можно

Таблица 2
Рентгенограммы минералов золота и меди

hkl	Кубическая сингония							Ромбическая сингония			
	Электрум палладисто-медистый		Аргентокупроаурит палладисто-родистый			Аурокупроит палладистый		Рожковит палладиевый		hkl	
	I	d _α эксп.	I	d _α эксп.	d _α расч.	I	d _α эксп.	d _α расч.	I		d _α эксп.
111	10	2,36	10	2,35	2,35	10	2,23	2,23	10	2,23	1.11.1
200	7	2,038	8	2,036	2,036	7ш	1,934	1,931	7	1,943	2.0.0.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	1,923	0.0.2
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1,815	(0.21.1)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1,734	(2.0.1)
(214)	—	—	1	1,673	1,662	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	1,603	(1.10.2)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1,577	(1.11.2)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	1,544	(1.12.2)
220	7	1,422	8	1,436	1,440	7ш	1,365	1,366	7	1,370	2.22.0
—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	1,363	2.0.2
(300, 221)	—	—	3	1,356	1,353	2	1,233	1,287	2	1,293	(2.22.1)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	1,235	(3.10.0)
(310)	—	—	3	1,295	1,283	3	1,223	1,221	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1,212	(3.12.0)
311	6	1,229	8	1,228	1,223	6ш	1,163	1,164	7ш	1,178	3.11.1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	7ш	1,161	1.11.3
222	5	1,178	6	1,176	1,176	5	1,115	1,115	5ш	1,116	2.22.2
—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	1,034	(0.21.3)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	1,071	(0.22.3)
(320)	—	—	—	—	—	2	1,070	1,071	—	—	—
a ₀ , Å	4,031±0,002		4,073±0,002			3,862±0,002		3,88±0,01		a ₀ = $\frac{V_0}{11}$	
	—		—			—		3,84±0,01		с ₀ , Å	
М-ние	Норильск-1					Талнах					М-ние
Источник	Данные автора					Разин и др., 1971					Источ-ник

Примечание. Камеры РКД (D = 57,3 мм). Асимметричный метод закладки пленки. Образец рожковита снимался при $Si_{K\alpha} + K\beta$, остальные образцы — при $Fe_{K\alpha} + K\beta$. Аналитик В. И. Мецанкина (ЦНИГРИ). В скобки заключены индексы сверхструктурных линий.

заклЮчить о принадлежности палладисто-медистого электрума к природным твердым растворам. Судя по отсутствию на его рентгенограммах сверхструктурных линий, этот природный твердый раствор серебра, меди и платиновых металлов в золоте обладает неупорядоченной структурой со статистическим распределением атомов серебра, меди и платиновых металлов в кристаллической решетке их растворителя — золота, при изоморфном взаимозамещении атомов каждого из этих металлов. За счет существенной роли в составе палладисто-медистого электрума серебра и меди удельный вес его — 13,80 г/см³ (см. табл. 3) занижен по сравнению с весом чистого золота — 19,28 г/см³.

Рентгенограммы палладисто-медистого электрума по дифракционному рисунку сильных отражений аналогичны с рентгенограммами палладисто-родистого аргентокупроаурита (см. табл. 2). Это говорит о сходстве кристаллических решеток и близости кристаллохимической приро-

Таблица 3

Кристаллохимические характеристики природных сплавов золота и меди

Природа сплава	Сингония	Тип структуры	Пространственная группа	Минерал и его полная формула, в атомн. %	Параметры элементарной ячейки, Å	Объем элементарной ячейки	n	Рентгеновская плотность
Твердый раствор металла в металле	Кубическая	Cu	$Fm\bar{3}m$	Электрум палладисто-медистый $Au_{42,2}Ag_{38,6}Cu_{10,5}Pd_{5,9} \times Rh_{2,1}Pt_{0,7}$	$a_0 = 4,081$	67,97	4	13,80
				Аргентокупроаурит палладисто-родистый — $Au_{48,6} \times Cu_{20,7}Ag_{17,0}Rh_{6,1}Pd_{5,7} \times Pb_{1,2}Pt_{0,7}$	$a_0 = 4,073$	67,57	4	14,09
				Аурокупроит палладистый — $(Cu_{50,8}Au_{36,1}Pd_{9,2}Rh_{2,1}Pt_{1,4} \times Ag_{1,0}Bi_{0,4})$	$a_0 = 3,862$	57,60	4	13,70
Интерметаллическое соединение Курнакова	ромбич.	CuAu II	$Pmm2$	Рожковит палладиевый — $(Cu_{44,9}Pd_{8,3}Rh_{4,1}Ag_{0,7} \times Ni_{0,3})_{58,3} (Au_{41,3}Bi_{0,4})_{41,7}$	$a_0 = b_0 = 3,88$ $c_0 = 3,84$	57,81	4	14,32

$K = \frac{1,66 \cdot n \cdot M}{V}$, где 1,66 — атомная единица массы; n — число атомов в элементарной ячейке; M — суммарный атомный вес, складываемый из произведений величин атомного веса каждого элемента на содержание этого элемента (в атомн. %); объем элементарной ячейки минерала кубической сингонии — $v = a_0^3$, ромбической — $v = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0$.

ды данных минералов, свидетельствует о принадлежности также и палладисто-родистого аргентокупроаурита к природным твердым растворам с гранцентрированной кубической решеткой, унаследованной от главного металла-растворителя (золота).

В отличие от палладисто-медистого электрума на рентгенограммах палладисто-родистого аргентокупроаурита присутствуют от 3 до 5 слабых линий. При индексировании их с учетом принадлежности структуры минерала к типу меди эти линии получают смешанные индексы, что говорит об их сверхструктурном характере и фиксирует начальную стадию упорядочения в расположении атомов «растворенных» металлов — меди, серебра и платиновых металлов в кристаллической решетке растворителя — золота (см. табл. 2). Различия в размере элементарной ячейки обусловлены тем, что в палладисто-родистом аргентокупроаурите по сравнению с палладисто-медистым электрумом значительно больше атомное количество меди и много меньше серебра (см. табл. 3). Более высокое содержание золота объясняет более высокую рентгеновскую плотность рассматриваемого минерала — $14,09 \text{ г/см}^3$.

Если судить по главным минералообразующим элементам, сопоставляемые минералы близки производным непрерывного ряда твердых растворов тройной системы Au — Ag — Cu; палладисто-медистый электрум — той части этого ряда, где серебро существенно преобладает над медью, а палладисто-родистый аргентокупроаурит — участку, где роль серебра и меди примерно одинакова (см. рис. 1).

Индексы почти всех отражений и интенсивность этих отражений на рентгенограммах палладисто-родистого аргентокупроаурита сходны с индексами отражений и их интенсивностями на рентгенограммах палладистого ауокуприта. Отличаются лишь величины межплоскостных

расстояний, характеризующие аналогичные отражения: на рентгенограмме палладистого аурукуприта они меньше (табл. 2). Тем самым подчеркивается аналогия кристаллических решеток данных минералов, принадлежность их к одному структурному типу меди (A — I с кубической плотнейшей упаковкой) и к одной пространственной группе $O_h^5 - Fm\bar{3}m$ ($n=4$, координационное число 12).

По химическому составу палладистый аурукуприт близок к производным бинарной системы Au—Cu, характеризующимся соотношением атомных количеств Au:Cu=2:3. Экспериментально установлено (Johansson, Linde, 1936), что кубической структурой среди этих

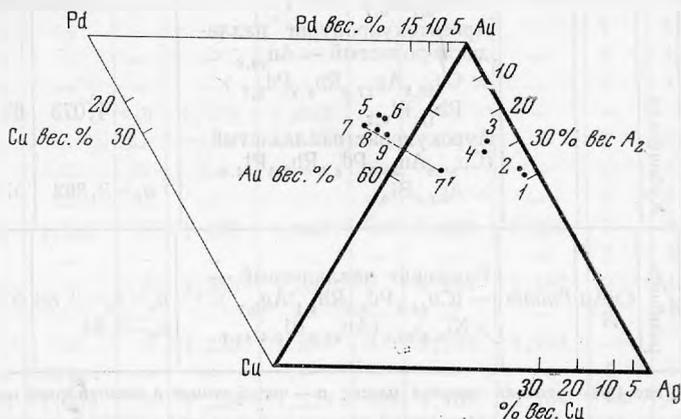


Рис 1. Диаграммы состава (в вес. %) минералов золота и меди месторождений норильского типа

Номера точек на диаграмме соответствуют номерам образцов в табл. 1. На диаграммах с золотом объединены Pt+Pb+Bi, с медью — Ni, с серебром — Pd+Rh+Sn, с палладием — Ag+Rh+Sn

производных обладают только неупорядоченные твердые растворы золота и меди. Из этого можно заключить о принадлежности и палладистого аурукуприта к неупорядоченным твердым растворам меди, золота и примесей других благородных металлов. То, что медь является главным растворителем в структуре этого минерала, подтверждается не только установленным составом аурукуприта, но и уменьшением (за счет меди) размера его элементарной ячейки ($a_0=3,862 \text{ \AA}$). Наличие на дебаеграммах палладистого аурукуприта от двух до четырех сверхструктурных линий (слабых, со смешанными индексами) говорит о начальной стадии упорядочения атомов меди, золота, палладия и других благородных металлов в его структуре.

Основные отражения, присутствующие на рентгенограмме палладистого аурукуприта, имеются и на рентгенограмме палладиевого рожковита. Наряду с ними, на последней есть также рефлексы основных расщепленных отражений, характеризующих тетрагональную структуру, а также ряд сверхструктурных линий, обусловленных доменным макростроением рассматриваемого минерала (см. табл. 2). Величина отношения осей $c_0 : a_0$ последнего по сравнению с тем же отношением для палладистого аурукуприта, равного единице, уменьшена до 0,990, что отражает выделение атомов в структуре палладиевого рожковита в дискретные плоскости (Нарои-Сабо, 1969, с. 140). А это указывает на более глубокое упорядочение его структуры по сравнению со структурой палладистого аурукуприта.

Сопоставимость дифракционных рисунков палладиевого рожковита и синтетического соединения Курнакова Cu_3Au_2 (при индифференцировании рентгенограмм с 11-кратным увеличением периода идентичности вдоль

оси *b*) свидетельствует о принадлежности рассматриваемого минерала к интерметаллическим соединениям Курнакова с ромбической структурой типа $Cu - Au II$ (Разин и др., 1971).

Близость химического состава (см. табл. 1 и рис. 1) и аналогия исходных структур природных сплавов золота в меди (со статистическим распределением атомов у палладистого аурупроита и упорядоченным распределением у палладиевого рожковита) позволяют рассматривать эти два минерала как модификационные разновидности.

Общие физические и химические свойства. В сульфидных медно-никелевых рудах месторождений норильского типа минералы золота и меди обычно представлены очень мелкими, зачастую микроскопическими выделениями размером от единиц до 100 *мк*, а в среднем 10—50 *ммк*. Изредка встречаются частицы до 0,5 *мм* и более. Форма выделений описываемых минералов неправильная, с извилистыми очертаниями, либо овальная, изометричная, нередко прожилковидная (рис. 2—4) и каплевидная, реже мирмекитовая, иногда угловатая в виде кристаллических зерен с несколькими гранями или удлиненная пластинчатая.

Сепарированные частицы минералов золота и меди, как правило, открыты черной тонкой и хрупкой пленкой гидроокислов меди и железа. Очищенные от этой пленки частицы минералов имеют сильный металлический блеск, они немагнитные. Палладисто-медистый электрум по своему цвету почти не отличим от обычного электрума: как и последний, он золотисто-желтый только с чуть заметным красноватым оттенком. Аргентокупроаурит красновато-розовый; палладистый аурупроит медно-розовый; палладиевый рожковит — бледно-розовый, а после светового травления буровато-розовый.

По механическим свойствам характеризуемые минералы ковкие, их зерна расплющиваются в тонкие пластинки. Если судить по квадратной форме отпечатков от алмазной пирамидки ПМТ-3 на их полированной поверхности (в аншлифах), то они механически изотропные. Палладисто-медистый электрум мягкий (табл. 4) и пластичный. Остальные минералы средней твердости и слабо пластичные: уже при нагрузках от 20 *Г* вокруг отпечатков на их поверхности появляются трещинки. На палладиевом рожковите эти трещинки имеют закономерную ориентацию, выявляющую спайность этого минерала в двух направлениях.

Самая высокая твердость у палладисто-родистого аргентокупроаурита — неупорядоченного твердого раствора меди и серебра в золоте (до 239,7 *кГ/мм²*). Ниже она у неупорядоченного раствора золота в меди-палладистого аурупроита (до 213,8 *кГ/мм²*). Твердость этих двух минералов выше, чем у палладиевого рожковита, являющегося упорядоченным твердым раствором меди и золота (см. табл. 3).

Полируются минералы золота и меди с трудом, особенно палладисто-медистый электрум и палладиевый рожковит.

Определенные отличия имеются и в оптических свойствах характеризуемых минералов золота и меди, как по величинам коэффициента отражения, полученным на свежетополированной поверхности (табл. 5), так и по визуальным характеристикам минералов в отраженном свете (табл. 7). Неупорядоченные природные твердые растворы (палладисто-медистый электрум, палладисто-родистый аргентокупроаурит и палладистый аурупроит) оптически изотропны и без двуотражения в то время, как природное интерметаллическое соединение — палладиевый рожковит анизотропен и иногда с ясным двуотражением.

Внутреннее строение индивидов рассматриваемых минералов при скрещенных николях однородное. Исключение составляют индивиды двуотражающего палладиевого рожковита, которые имеют полисинтетически-двойниковое внутреннее строение.



Рис. 2. Сrostок палладисто-родистого аргентокупроаурита (1) с поляритом — Pd(Pb, Bi) (2) Цементный полированный шлиф. Запрессовано в полистироле. Увел. 600

Аргентокупроаурит побурел в результате светового травления. Сrostок извлечен из концентрата вкрапленных сульфидных руд Норильского месторождения



Рис. 3. Зерно палладиевого рожковита с мirmekитоподобной каймой кустелита (ярко-белое). Цементный полированный шлиф. Запрессовано в эпоксидной смоле. Увел. 110

Извлечено из концентрата сплошных залежных руд Талнахского месторождения

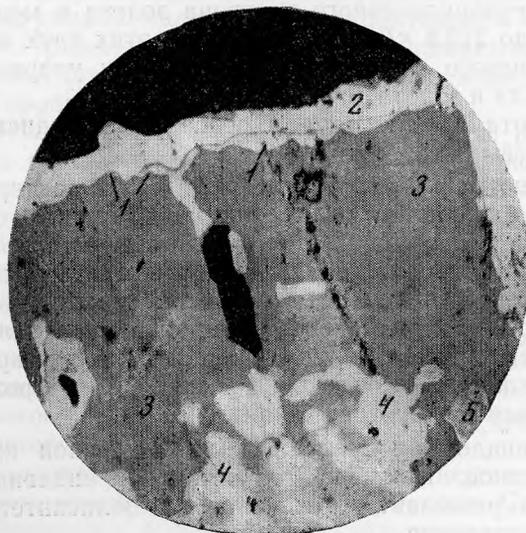


Рис. 4. Прерывистая кайма палладистого аурукуприта (1), вокруг сrostка минералов палладия и платины (2—5). Вмещающая среда — кубанит (черное). Аншлиф, увел. 350

- 2 — ферроплатина;
- 3 — минерал $(Pd, Cu, Pt)_{4-x}Sn$;
- 4 — минерал $(Pt, Pd)_{3-x}Sn$;
- 5 — минерал $Pd_{5+x}(Sn, As)_3$. Кубанит-талнахитовая руда залежи, Талнахское месторождение

Таблица 4

Твердость микровдавливания минералов золота и меди

Электрум палладисто-медистый		Аргентокупроаурит палладисто-родистый		Рожковит палладиевый		Аурокупроит палладистый		Нагрузки — Р, Г
Н	Н ₀	Н	Н ₀	Н	Н ₀	Н	Н ₀	
$\frac{58,8-61,7}{60,7(3)}$	$\frac{2,6-2,7}{2,7}$	—	—	$\frac{146,8-157,3}{152,4(3)}$	3,6	—	—	5
$\frac{63,8-68,6}{65,8(3)}$	$\frac{2,7-2,8}{2,7}$	—	—	$\frac{160,5-187,6}{175,2(5)}$	$\frac{3,7-3,9}{3,8}$	$\frac{188,4-198,6}{194,9(5)}$	$\frac{3,8-3,9}{3,9}$	10
62,9 (2)	2,7	$\frac{234,3-239,7}{237,0(2)}$	$\frac{4,1-4,2}{4,2}$	$\frac{159,7-188,7}{176,1(7)}$	$\frac{3,7-2,8}{3,8}$	$\frac{195,4-213,8}{204,6(8)}$	$\frac{3,9-4,0}{4,0}$	20
—	—	$\frac{211,5-216,1}{213,8(2)}$	4,0	$\frac{155,0-190,3}{168,3(9)}$	$\frac{3,6-3,9}{3,7}$	$\frac{188,6-205,9}{198,8(10)}$	$\frac{3,8-4,0}{3,9}$	50
—	—	—	—	—	—	$\frac{184,1-199,5}{193,7(3)}$	$\frac{3,8-3,9}{3,9}$	100

Примечание. 1. Измерения на ПМТ-3, тарированном по свежему сколу кристалла поваренной соли с $N_{5Г}=21 \text{ кг/мм}^2$. Экспозиция 15 сек.

2. Величины твердости микровдавливания — N , кг/мм^2 и класс твердости — $N_0=0,675 \sqrt[3]{N}$ приводятся в виде дроби с числителем из крайних значений и знаменателем — среднеарифметическим из общего количества замеров, приводимого в скобках.

Таблица 5

Дисперсия отражательной способности (R , %) в воздухе минералов золота и меди

Минерал	460	480	500	540	580	620	660	700	750	800	850	900	950 нм
Электрум палладисто-медистый R^1m	59,8	57,8	62,7	70,1	75,6	79,1	81,7	84,2	87,4	90,1	92,4	92,8	94,1
Аргентокупроаурит палладисто-родистый R^1m	50,2	51,1	53,4	53,0	64,3	69,1	72,4	77,2	81,2	82,9	86,7	87,2	87,7
Рожковит R^1p	45,0	43,9	49,0	53,0	53,0	64,0	67,4	72,4	76,2	79,0	81,0	81,0	81,5
палладиевый R^1g	49,6	50,5	52,8	57,1	63,5	68,5	71,6	76,4	80,5	82,1	86,0	86,5	86,9
Аурокупроит палладистый R^1m	47,8	50,2	52,0	53,8	63,1	66,4	71,2	74,6	78,7	81,6	82,1	83,2	84,3

Примечание. Измерения свежеполитрованных шлифов выполнены на ФМЭ — 1 Л. И. Бочек (ЦНИГРИ); объектив 21*; апертура 0,40; эталон — кристалл пирита.

Таблица 6

Диагностическое травление минералов золота и меди в капле реагентов

Минерал	KOH	FeCl ₃	HgCl ₂	KCN	HCl (1:1)	HNO ₃ (1:1)	HCl конц.	H ₂ SO ₄ конц.	HNO ₃ конц.	CrO ₃ + HCl	Царская водка
Электрум палладисто-медистый	—	—+	+	+++	—	—	—	—	+	++	+++
Аргентокупроаурит палладисто-родистый	—	—	—	++	—	—	—	—	—	—	++
Рожковит палладиевый	—	—	—	++	—	—	—	—	—	—	++
Аурокупроит палладистый	—	—	—	++	—	—	—	—	—	—	+

Примечание: — реагент не действует; —+ иногда затравливает; + реагент слабо затравливает; ++ затравливает; +++ сильно травит.

Рассматриваемые минералы химически стойкие (табл. 6). При сравнении их относительной химической стойкости выявляется, что наименее устойчив палладисто-медистый электрум, который травится в капле ряда стандартных реагентов (FeCl₃ 20%, HgCl₂, HNO₃ конц., CrO₃ + HCl), по отношению к которым остальные минералы золота и меди остаются инертными. При наличии в палладиевом рожковите повышенного содержания родия этот минерал слабее травится в капле KCN и царской водки. В парах кислот (конц. и 1:1) и царской водки палладиевый рожковит и палладистый аурокупроит не затравливаются, лишь изредка при травлении в парах царской водки на поверхности зерен палладиевого рожковита образуется стирающийся буровато-желтый налет.

Условия нахождения. Выделения описываемых минералов находятся в сплошных сульфидных рудах жил и залежей и во вкрапленных рудах материнских габбро-долеритов и метасоматически измененных вмещающих пород экзоконтакта рудоносных интрузивов (скарноидов, роговиков, песчаников). В рудах минералы рассеяны крайне неравномерно и являются редкими образованиями. Относительно наиболее распространены палладиевый рожковит, остальные минералы золота и

меди встречаются много реже. Заключены минералы золота и меди главным образом среди рудных минералов — прежде всего сульфидов меди (в халькопирите, кубаните, таллахите), а также в пирротине, магнетите, реже в лентландите. Встречаются они и в нерудной среде — в серпентине, биотите, плагиоклазах, хлоритах и др. Для минералов золота и меди характерны сростания с минералами палладия и платины, золота и серебра (см. рис. 2—4), а также с гипогенными сульфидами — валлеритом, галенитом, сфалеритом и др. Из минералов благородных металлов чаще всего в сростаниях с минералами золота и меди наблюдаются станиды палладия и кюстелит.

Появились рассматриваемые минералы на завершающих стадиях процесса магматогенного сульфидного рудообразования, после резорбируемых ими таллахита и минералов палладия и платины и до корродирующих их кюстелита и гипогенного халькозина. Последовательность их образования характеризуется рядом: палладистый аурупроит → палладиевый рожковит → палладисто-родистый аргентокупроаурит → палладисто-медистый электрум.

К вопросу о номенклатуре природных сплавов золота с медью.

Первыми сведениями о природном сплаве золота с медью, вероятно, является упоминание Дидея (Diday, 1850) о «медистом золоте» из серпентинитов района Генуи в Италии. В нынешнем веке появился целый ряд указаний о находках «медистого золота» на Южном Урале в Карабашской элювиально-аллювиальной россыпи (Николаев, 1908), а также на Среднем Урале в россыпи р. Быньга (Иванов, Переляев, 1941). «Медистое золото» обнаружено в Индонезии в золото-платиновой россыпи реки Риам-Канан на юго-востоке Борнео (Черник, 1912), в ЮАР в сплошных сульфидных рудах медно-никелевого месторождения Инсизва (Scholtz, 1936) и дунитовой трубки Мойхук (Рамдор, 1962). Найдено оно в одном из золото-кварцевых месторождений Австралии и в месторождениях Танквара в Финляндии и Керр — Эдисон в Канаде (Рамдор, 1962).

Наиболее достоверны сведения о «медистом золоте» из гранатовых и кварцевых прожилков золоторудного проявления Карабаш (Ложечкин, 1935) и из россыпи Риам-Канан, генетически связанной с перидотитами. Последняя находка была недавно подтверждена Е. Ф. Штумпфлем и А. М. Кларком (Stumpfl a. Clark, 1964—65), которые методом электронного микронзондирования определили следующий состав розовых (в отраженном свете) зерен природных медно-золотых сплавов, извлеченных из золото-платиновых концентратов:

Номер образца	Содержание, вес. %			
	золото	медь	серебро	сумма
49	86,7	6,4	7,0	100,1
50	89,7	10,7	0,8	101,2
89	87,9	11,4	1,0	100,3
88	52,0	16,6	30,2	98,8
69	77,0	21,2	Не опр.	98,2
106	75,6	23,5	Не опр.	99,1
101	70,8	30,3	0,5	101,6

Среди номенклатурных разновидностей природных сплавов золота с медью, наряду с «медистым золотом», в литературе упоминается «купроаурит» (Ложечкин, 1939) и «аурикуприд» (Рамдор, 1967). «Купроауритом» М. П. Ложечкин (1939) называет природный твердый раствор

Таблица 7
Основные характеристики минералов — природных сплавов золота с медью

Минералы золота и меди	«Лурикуприд»	Медистое золото или «кх проаурид»	Лурукупроит палладистый	Рожковит палладиевый	Аргентокупроаурид палладисто-родистый	Электрум палладисто-медистый
Источник	Рамдор, 1967	Ложечкин, 1939	Данные автора	Разин и др., 1971	Разин, Юркина, 1971	
Формула	Cu_3Au (?)	Близка к $\text{Cu}_{60}\text{Au}_{40}$	$\text{Cu}_{53}\text{Au}_{38}\text{Pd}_9$	$(\text{Cu}, \text{Pd})_{3-x}\text{Au}_2$	$\text{Au}_{50}\text{Cu}_{21}\text{Ag}_{17}\text{Rh}_6\text{Pd}_6$	$\text{Au}_{43}\text{Ag}_{40}\text{Cu}_{11}\text{Pd}_6$
Химическая природа	Интерметаллическое соединение (?)	Твердые растворы золота (и палладия) в меди		Интерметаллическое соединение	Твердые растворы серебра, меди, палладия (и родия) в золоте	
Минералообразующий состав, вес. %/ат. %						
Золото	Состав не определялся		61,6/36,1	65,6/44,3	67,7/48,6	58,4/42,2
Медь			28,4/50,8	23,0/44,9	9,2/20,7	4,7/10,5
Серебро			0,9/1,0	0,6/0,7	12,8/17,0	29,2/38,6
Палладий			7,7/8,2	7,1/8,3	4,2/5,7	4,4/5,9
Родий			1,9/2,1	3,4/4,1	4,3/6,1	1,5/2,1
Сингония	Кубич. (?)	Кубич.	Кубич.	Ромбич.	Кубич.	Кубич.
Параметры элементы ячейки, Å	Не опр.	$a_0=3,83$	$a_0=3,862$	$a_0=b_0=3,88;$ $c_0=3,84$	$a_0=4,073$	$a_0=4,081$
Рентг. плотность, г/см ³	Не опр.	Не опр.	13,70	14,32	14,09	13,80
Твердость: Н ₀	»	»	3,9	3,7	4,1	2,7
Н _{ср} , кг/мм ²	»	»	199	170	225	63
Отражение R' нм, %	»	»	63,1	59,0—63,5	64,3	75,6
Цвет в отраженном свете	Фиолетово-розовый	Желтовато-красный	Светло-оранжево-розовый	Светло-сиреневато-розовый	Светло-красновато-розовый	Светло-желтый
Двуотражение	Не отмечено	Не отмечено	Отсутствует	Иногда, от розового до розовато-серого	Отсутствует	
В поляризованном свете	Изотропный?	Слабо анизотропное	Изотропный	Умеренно анизотропный (от желтого до темно-серого)	Изотропный	Изотропный
Световое травление	Не отмечается	Не отмечено	Не подвергается	Буреет (травится)	Буреет (травится)	Не подвергается
Цвет сепарированных частиц	Красный	Красноватый	Медно-розовый	Бледно-розовый	Красновато-розовый	Золотисто-желтый с красноватым оттенком

золота в меди, для которого приводит неполную минераграфическую характеристику (см. табл. 7), указывает сильную затравливаемость в капле KCN и окисляемость при нагреве до 260°С, отмечает участие этого минерала в сложении матрицы пластинчатой микроструктуры типа распада твердого раствора (пластинки данной микроструктуры представлены высокопробным золотом), а главное приводит параметры кубической элементарной ячейки «купроаурида» — $a_0 = 3,83 \text{ \AA}$, отвечающие твердому раствору 40% золота в 60% меди. Сведения о химическом составе характеризующей минеральной фазы отсутствуют: опубликованы только анализы «медистого золота», являющегося, по М. П. Ложечкину (1939), двухфазной смесью высокопробного самородного золота с природным твердым раствором золота в меди.

Предложение М. П. Ложечкина (1939) назвать «купроауридом» изученный им природный твердый раствор золота в меди принять нельзя, так как купроауриды, как известно, являются не твердыми растворами, а интерметаллическими соединениями золота и меди.

«Аурикуприд» П. Рамдора (1967) это фиолетово-розовый минерал; предположительная формула его Cu_3Au . Минерал встречен в серпентинитах Лаксии (Кипр) в ассоциации с розовато-золотисто-желтым минералом без названия, гипотетического состава CuAu . Диагностика обоих минералов основывается на единственном признаке — окраске в отраженном свете; изучение химического состава и рентгеновской структуры их не проводилось (см. табл. 7), т. е. оснований для номенклатурных предложений по этим минералам явно недостаточно. Между тем, один из них назван «аурикупридом», чем подчеркивается принадлежность его к классу интерметаллических соединений и указывается, что медь в этом минерале является квазианионом, а золото — квазикатионом. Многочисленные физико-химические исследования классической бинарной системы $\text{Cu} - \text{Au}$, начиная с первой в этом ряду работы Н. С. Курнакова с сотрудниками (1914), показывают, что интерметаллиды золота и меди бывают только ауридами (CuAu , Cu_3Au и т. д.) с золотом — квазианионом и медью — квазикатионом. «Аурикуприды» в этой системе не существуют. Отсюда ясно, что название «аурикуприд», предложенное П. Рамдором (1967), в принципе неверно.

Таким образом, совершенно очевидно, что номенклатура природных сплавов золота и меди требует разработки. По аналогии с искусственными сплавами мы предлагаем принять для природных сплавов рациональную номенклатуру с учетом состава и кристаллохимических особенностей минералов. К названиям по главным минералообразующим элементам, располагающимся в порядке возрастания их атомных количеств, в твердых растворах следует прибавлять к главному (последнему в названии) минералообразующему элементу окончание «ит», а в интерметаллических соединениях к элементу — квазианиону добавлять окончание «ид». В качестве примера можно привести название недавно описанного нами рожковита, являющегося природным интерметаллическим соединением $(\text{Cu}, \text{Pd})_3\text{Au}_2$ — палладиевым купроауридом (Разин и др., 1971), и охарактеризованного в настоящей статье природного твердого раствора золота в преобладающей (по атомному количеству) меди — аурикупроит.

В сульфидных рудах медно-никелевых месторождений норильского типа установлен своеобразный комплекс минералов — природных сплавов золота и меди. Три из них — палладисто-медистый электрум, собственно аргентокупроаурит и палладисто-родистый аргентокупроаурит являются природными твердыми растворами меди, палладия и других металлов в золоте. Палладисто-медистый электрум представляет крайние (серебряно-золотые) члены изоморфного ряда $\text{Ag} - \text{Au} - \text{Cu}$, а оба аргентокупроаурита — средние (серебряно-медные) члены того же ряда.

Палладистый и палладисто-серебристый аурукупроиты являются кубической модификацией природных сплавов золота с медью, палладием и другими металлами, а палладиевый рожковит — ромбической их модификацией. Аурукупроиты — твердые растворы золота, палладия и т. д. в меди, палладиевый рожковит — интерметаллическое соединение меди и палладия с золотом.

Собственно аргентокупроаурит и палладисто-родистая его разновидность, палладистый и палладисто-серебристый аурукупроиты, как и палладиевый рожковит, являются новыми минералами золота и меди с повышенной примесью палладия. Они существенно отличаются от предварительно изученных минералов золота и меди, упоминающихся в публикациях М. П. Ложечкина (1935, 1939), П. Рамдора (1962, 1967) и Е. Ф. Штумпфля (Stumpfl a. Clark, 1964—65) (см. табл. 7).

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов А. А., Переляев А. П. Минералы группы золота. Минералогия Урала, т. 2. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1941.
- Курнаков Н. С. и др. Изв. СПб. политехнического института, 1914, 22.
- Ложечкин М. П. Карабашское месторождение медистого золота. — Труды УФ АН СССР, 1935, вып. 4.
- Ложечкин М. П. Новые данные о химическом составе «медистого золота». — Докл. АН СССР, 1939, 24, № 5.
- Минералы, т. 1. Изд-во АН СССР, 1960.
- Нараи-Сабо И. Неорганическая кристаллохимия. Будапешт, Изд-во АН Венгрии, 1969.
- Николаев А. В. Материалы по геологии России, 1908, 23.
- Разин Л. В., Боришанская С. С. Минеральные формы нахождения платиновых металлов и золота во вкрапленных рудах месторождения Норильск I. Труды ЦНИГРИ, вып. 87, 1970.
- Разин Л. В. и др. Новый природный интерметаллид золота, меди и палладия из руд Талнахского месторождения. — Записки Всес. минералог. об-ва, вып. 1, 1971.
- Разин Л. В., Юркина К. В. О составе золотой минерализации вкрапленных руд Норильского месторождения. — Геол. рудн. месторожд., 1971, № 1.
- Разин Л. В., Бегизов В. Д. Золото-серебряная минерализация Талнахского и Октябрьского месторождений. — Геол. рудн. месторожд. № 6, 1973.
- Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. ИЛ., 1962.
- Рамдор П. О широко распространенном парагенезисе рудных минералов, возникающих при серпентинизации. — Геол. рудн. месторожд., 1967, № 2.
- Черник Г. П. К минералогии острова Борнео. — Труды геологического музея АН, 6, вып. 3, 1912.
- Diday. Ann. Mines., 18, 1850.
- Johansson C. H., Linde I. O. Röntgenographische und elektrische Untersuchungen des Cu-Au-Systems. — Ann. Phys., 25, H. 1, 1936.
- Scholtz D. L. The magmatic nickeliferous ore deposits of East Griqualand and Pondoland. — Publ. Univ. Pretoria, ser. II, 1, 1936.
- Stumpfl E. F., A. M. Clark. Electron-probe microanalysis of gold-platinoid concentrates from Southeast Borneo. — Trans. Inst. Mining and Metallurgy, 74, p. 14, 1964—65.