

УДК 549.3

ЗОЛОТО И СЕРЕБРО В СОСТАВЕ ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД ФЕДОРОВО-ПАНСКОГО ИНТРУЗИВНОГО РАССЛОЕННОГО КОМПЛЕКСА

В. В. Субботин, Д. А. Габов, А. У. Корчагин, Е. Э. Савченко
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Золотосеребряная минерализация в платинометалльных месторождениях и рудопоявлениях Федорово-Панского интрузивного комплекса сингенетична вкрапленным первично-магматическим Cu-Ni-Fe-сульфидам и платиноидам. Практически значимыми концентраторами и золота, и серебра являются Au-Ag-сплавы. Для серебра большое значение также имеют аргентопентландит, сложные сульфиды и теллуриды Ag и Pd, твердые растворы серебра в халькопирите. Составы Au-Ag-сплавов меняются от высокопробного золота до обогащенного золотом серебра. Среди многочисленных сложных сульфидов и теллуридов — концентраторов серебра — установлены колдвеллит (первая находка в России и вторая в мире) и луккулайсваараит (вторая находка в России и мире). В ассоциации с Ag-Pd-минералами впервые в России установлен природный германид палладия — маратонит.

Ключевые слова:

Федорово-Панский интрузивный комплекс, малосульфидное платинометалльное оруденение, минералы золота и серебра, платиноиды, сульфиды, теллуриды, колдвеллит, луккулайсваараит, маратонит.

GOLD AND SILVER IN THE COMPOSITION OF PGE ORES OF THE FEDOROV-PANA LAYERED INTRUSIVE COMPLEX

Victor V. Subbotin, Dmitriy A. Gabov, Alexey U. Korchagin, Eugene E. Savchenko
Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The gold-silver mineralization in PGE deposits and ore localities of the Fedorov-Pana intrusive complex and disseminated originally magmatic Cu-Ni-Fe-sulphides and platinoids is syngenetic. Au-Ag-alloys are practically valuable concentrators of both gold and silver. Argentopentlandite, complex sulphides and tellurides of Ag and Pd, solid solutions of silver in chalcopyrite are also important for silver. Composition of Au-Ag-alloys vary from fine gold to silver rich in gold. Among numerous silver concentrators of complex sulphides and tellurides, coldwellite (the first find in Russia and the second find in the world) and lukkulaisvaarait (the second find in Russia and in the world) have been defined. The native palladium germanite, i. e. marathonite, associated with Ag-Pd-minerals, has been first discovered in Russia.

Keywords:

Fedorov-Pana intrusive complex, low sulphide PGE mineralization, gold and silver minerals, PGM, sulphides, tellurides, coldwellite, lukkulaisvaarait, marathonite.

Введение

Золото и серебро являются закономерными и постоянными составляющими геохимической ассоциации элементов благородных металлов магматических сульфидных месторождений платинометалльных руд. В рудах крупнейших мировых месторождений этого типа концентрации золота варьируют от сотых и десятых долей до первых граммов на тонну. Сведения о содержаниях серебра чаще всего отсутствуют, так как в подавляющем большинстве случаев при оценке месторождений пробы на данный компонент не анализируются.

В рудах месторождений Федорова тундра, Киевей, Северный Каменник, Восточный Чуарвы, недавно разведанных в Федорово-Панском интрузивном комплексе на Кольском п-ове [1, 2 и др.], содержания золота, по данным технологического опробования, составляют в среднем 0,11–0,22 г/т, серебра — 0,35 г/т. В отдельных рядовых пробах концентрации золота могут достигать 1–2 г/т, серебра — 2,38 г/т. Эти значения согласуются с уровнями содержаний золота и серебра в рудах большинства малосульфидных платинометалльных месторождений (табл. 1). В то же время, минералогические исследования золотосеребряных минеральных ассоциаций Федорово-Панской интрузии показали, что они обладают рядом специфических особенностей состава и генезиса в сравнении с другими мировыми аналогами.

Таблица 1

Содержания Au, Ag, металлов платиновой группы (г/т) и других рудогенных элементов (мас. %) в малообъемной технологической пробе платинометалльной руды месторождения Федорова тундра и в других месторождениях мира [3, 4]

Месторождение	Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Ni	Cu	S _{общ}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Федорово-Панский комплекс, месторождение Федорова тундра	0,14	0,35	0,36	1,45	0,027	0,064	0,004	<0,004	0,07	0,13	0,44
Норильск											
месторождение Октябрьское, малосульфидные руды	0,252	Н. д.	2,015	6,085	0,285	0,041	0,024	0,011	0,80	1,10	1,55
месторождение Норильск I, малосульфидные руды	0,16	0,70	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.					
Бушвельд											
сульфидные руды Верхней зоны	0,47	Н. д.	0,73	0,90	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,15	0,96	2,26
Платриф, сульфидная минерализация в пегматитовых норитах	0,14	Н. д.	1,13	0,93	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,14	0,05	Н. д.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Инtruзия Пеникат											
риф SJ	0,08	Н. д.	2,67	2,70	0,37	0,12	0,10	0,06	0,16	0,06	0,13
риф AP I	0,25	Н. д.	2,29	6,64	0,22	0,03	0,04	0,02	0,06	0,11	0,29
риф PV	0,27	Н. д.	3,91	2,32	0,09	0,11	0,08	0,05	0,24	0,25	0,79
Маргинальные серии блоков Суханко, Контиярви, риф SK инtruзии Наркауc	0,13	Н. д.	0,38	1,54	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,08	0,18	Н. д.
Садбери, месторождение Ривер Вэлли	0,063	Н. д.	0,344	1,016	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,021	0,1	Н. д.
Апатитовые оливиниты Барановского месторождения	1,91	8,5	0,45	17,53	0,004	0,030	Н. д.	0,015	0,008	1,23	6,90

Примечание. Н. д. — нет данных.

Методика исследования

Минералого-геохимическое исследование золотосеребряных минеральных ассоциаций месторождений Федорово-Панской инtruзии выполнено одновременно с изучением вещественного состава руд этих месторождений. Оно проведено по методике, разработанной и апробированной на малосульфидных платинометалльных рудах месторождений В. Чуарвы, Киевей, Федорова тундра и С. Каменник, принятых на государственный баланс по результатам геолого-разведочных работ 2001–2014 гг. [1, 2 и др.]. Используемая методика предполагает исследование минералов благородных металлов в естественных полированных образцах руд и пород, чем выгодно отличается от широко распространенных сейчас методов изучения минеральных зерен в раздробленном и предварительно обогащенном материале — протолочках и концентратах. Методика позволяет наблюдать минералы в естественных формах, размерах, ассоциациях и взаимоотношениях, не нарушенных никакими техногенными процессами.

Всего по месторождениям и рудопроявлениям изучено около 2000 аншлифов. По химическому составу диагностировано более 5600 зерен минералов платиновых металлов, золота и серебра; определены их размеры и микроассоциации. Для каждого месторождения дана количественная оценка распространенности различных благороднометалльных минералов.

Выполнено более 2000 SEM/EDS-анализов минералов благородных металлов, главных сульфидов, оксидов, силикатов и др. на SEM Leo-1450 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash-5010 и программным обеспечением Quantax-200. Несколько сотен этих анализов продублированы на рентгеноспектральном микроанализаторе MS-46 Cameca с использованием стандартных методик и эталонов. Анализы рудных проб на благородные и цветные металлы, использованные в настоящей статье, сделаны в сертифицированных

лабораториях: Au, Pt, Pd — пробирный анализ с последующим определением методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой; Cu, Ni — атомно-абсорбционный анализ после кислотного разложения.

Геохимические особенности распределения золота и серебра в рудах

Во всех платинометалльных рудных объектах (месторождениях, рудопроявлениях, отдельных рудных телах и зонах) Федорово-Панской интрузии концентрации золота и серебра пространственно и генетически тесно связаны с сульфидной Cu-Ni-платинометалльной минерализацией. При очень больших объемах опробования (только на месторождении Федорова тундра отобрано и проанализировано более 100 тыс. проб более чем по 500 скважинам) ни разу не установлено факта наличия золотоносной зоны в отрыве от контуров платинометалльных руд.

Генетическое родство и единство золотосеребряной, платинометалльной и медно-никелевой ассоциаций отражается в тесных положительных корреляционных связях между всеми основными компонентами руд (рис. 1, 2). На представительной выборке установлены тесные положительные корреляционные связи содержаний Au со всеми рудогенными компонентами (коэффициент корреляции r , рис. 1): максимальные для Pt — 0,9 и Pd — 0,89; минимальные для Ni — 0,73, S — 0,76 и Cu — 0,77. Более низкие в сравнении с платиной и палладием коэффициенты корреляции золота с цветными металлами и серой является косвенным подтверждением отсутствия значимых концентраций Au в виде твердых растворов в рудообразующих сульфидах — пентландите, халькопирите, пирротине.

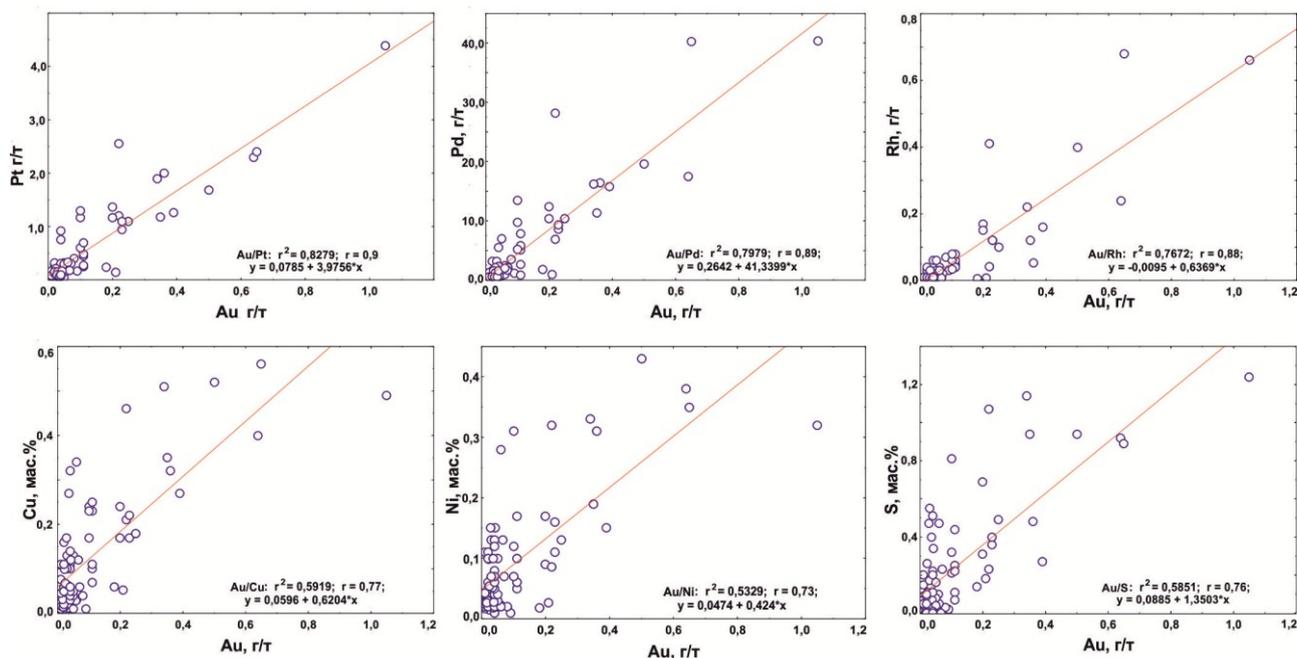


Рис. 1. Соотношения содержаний золота с основными рудогенными элементами в рудных анортозитах участка Ю. Пешемпахк, Западно-Панский массив; 80 рядовых керновых проб с содержанием $\sum Pt + Pd + Rh + Au \geq 0,5$ г/т. Здесь и на рис. 2 показаны направления и уравнения линейных трендов, величины достоверности аппроксимации (r^2), коэффициенты корреляции (r) между соответствующими компонентами

Золото и серебро в составе платинометаллических руд...

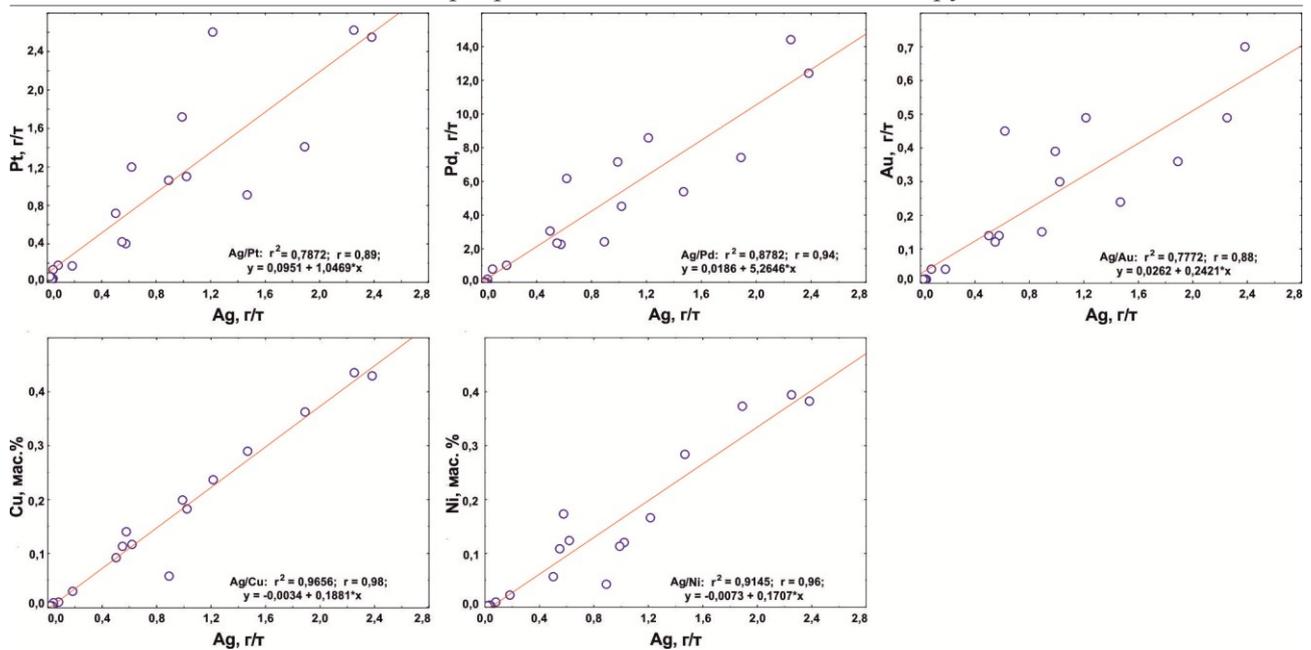


Рис. 2. Соотношения содержаний серебра с основными рудогенными элементами по рудному сечению скважины BG-N-126, месторождение С. Каменник, Западно-Панский массив; 20 рядовых керновых проб с содержанием $\sum Pt + Pd + Au \geq 0,05$ г/т

Корреляция содержаний Ag с рудогенными элементами еще более тесная (r , рис. 2): с Au — 0,88, Pt — 0,89, Pd — 0,94, Ni — 0,96, Cu — 0,98. Такой характер связей (см. выше про золото), напротив, свидетельствует о существенном вкладе в общий баланс твердых растворов Ag, как минимум, в халькопирите.

Исследование состава основных сульфидов из руд месторождения Федорова тундра методом лазерной абляции показало, что содержание Ag в халькопирите варьирует от десятых долей до первых граммов на тонну, достигая 1133,19 г/т [5], а максимальная концентрация растворенного в халькопирите золота, по тем же данным, только 0,029 г/т.

По тем же данным [5], в других главных рудообразующих сульфидах — пентландите и пирротине — содержания Au и Ag существенно ниже, г/т: 0,01–0,02 и 0,03–5,78 соответственно. Из этого следует, что только халькопирит способен обеспечить высокие, вплоть до промышленных концентрации серебра. Такой вывод становится очевидным исходя из того, что общее количество сульфидов в рудах разных месторождений Федорово-Панского комплекса обычно составляет 1–3 мас. %, а доля халькопирита варьирует от одной трети до половины общей сульфидной массы.

Минералы золота и серебра

В ранних публикациях, посвященных Au-Ag-минералам Федорово-Панского комплекса, отмечается не только их минералогическое значение, но и их важная промышленная роль в составе комплексного оруденения [6, 7, 8]. Изученный в настоящее время на представительных выборках приближенно-количественный минеральный состав платинометаллических руд Федорово-Панских месторождений приведен в табл. 2.

Распространенность минералов платиновых металлов (МПМ), золота и серебра (об. %) в рудах месторождений Федорово-Панского комплекса (по данным диагностики 5673 зерен SEM/EDS-методом)

МПМ и минеральные фазы	Федорова тундра	Киевей	С. Каменник	В. Чуарвы
1	2	3	4	5
Золото (Au,Ag,Pd)	0,9	1,1	0,6	0,2
Серебро (Ag,Au,Pd)	е. з.	е. з.	е. з.	–
Платина (Pt,Cu,Pd)	е. з.	–	–	–
Изоферроплатина (Pt,Pd) ₃ Fe	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Хонгшит(Pt,Pd)Cu	–	е. з.	е. з.	–
Палладий (Pd, Hg,Ag)	е. з.	–	–	–
Звягинцевит Pd ₃ Pb	–	е.з.	–	–
Рустенбургит Pt ₃ Sn	е. з.	е. з.	–	е. з.
Нигглиит PtSn	е. з.	-	–	е. з.
Паоловит(Pd,Au) ₂ Sn	1,7	е. з.	е. з.	е. з.
Атокит (Pd,Pt,Au) ₃ Sn	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Маратонит Pd ₂₅ Ge ₉ *	е. з.	–	–	–
Паларстанид Pd ₅ (Sn,As) ₂	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Куперит-брэггит (Pt,Pd,Ni)S	14,7	10,6	17,1	27,3
Маланит Cu(Pt,Ir) ₂ S ₄	–	е. з.	е. з.	–
Высоцкит (Pd,Pt,Ni)S	6,8	14,3	35,1	23,1
Лафламмеит Pd ₃ Pb ₂ S ₂	–	–	е. з.	–
КолдвеллитPd ₃ Ag ₂ S*	е. з.	–	е. з.	–
Лаурит (Ru,Os)S ₂	–	е. з.	е. з.	–
Платарсит (Pt,Rh,Ru)AsS	–	–	–	е. з.
Ирарсит (Ir,Ru,Rh,Pt)AsS	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Холлингвортит (Rh,Pt,Pd)AsS	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Сперрилит PtAs ₂	1,1	1,2	е. з.	13,1
Стиллуотерит Pd ₈ As ₃	4,7	1,0	е. з.	2,5
Палладоарсенид Pd ₂ As	е. з.	е. з.	е. з.	1,5
Меньшиковит Pd ₃ Ni ₂ As ₃	е. з.	–	е. з.	–
Винцентит (Pd,Pt) ₃ (As,Sb,Te)	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Атенеит (Pd,Hg) ₃ As	е. з.	–	е. з.	–
ТёрнрооситPd ₁₁ As ₂ Te ₂	е. з.	0.1	е. з.	–
Мертиит Pd ₁₁ (Sb,As) ₄	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Мончеит (Pt,Pd)(Te,Bi) ₂	8.4	15,4	13,9	4,4
Кейтконнит Pd _{3-x} Te	е. з.	0,3	е. з.	0,5
Котульскийит Pd(Te,Bi)	45,5	40,4	31,1	25,9

1	2	3	4	5
Меренскиит (Pd,Pt)(Te,Bi) ₂	10,6	13,1	0,9	0,5
Теллурупалладинит Pd ₉ Te ₄	—	е. з.	е. з.	е. з.
Соболевскиит PdBi	4,6	0,5	е. з.	—
Фрудит PdBi ₂	е. з.	—	—	—
Майченерит (Pd,Pt)BiTe	е. з.	е. з. (?)	—	—
Темагамит Pd ₃ HgTe ₃	е. з.	е. з.	—	е. з.
<i>Теларгпалит</i> (Pd,Ag) _{3+x} Te	е. з. (?)	0,5	е. з.	—
<i>Сопчеит</i> Ag ₄ Pd ₃ Te ₄	е. з.	0,5	е. з.	е. з.
<i>Луккулайсваарит</i> Pd ₁₄ Ag ₂ Te ₉	—	—	е. з.	е. з.
Без названия (Re,Cu,Pt)S ₂ ?	—	е. з.	—	—
Без названия Pd _{2-x} (Bi,Pb)(S,Se) (?)	е. з.	е. з.	—	—
<i>Без названия</i> Pd ₅ Ag(Pb,Bi)S ₂ (?)	—	е. з.	е. з.	—
<i>Без названия</i> (Pd,Ag) ₇ Se ₅ ?	—	—	е. з.	—
<i>Без названия</i> (Pd,Au) _{2+x} (As,Sn) (?)	е. з.	—	—	0,1
Без названия Pt ₅ Te ₇ ?	—	е. з. (?)	—	е. з.
Количество диагностированных зерен	1460	1015	1900	1298

Примечание. Курсивом выделены Au,Ag-содержащие минералы.

*Первая находка в России.

В рудах месторождений установлено 48 минералов и неназванных минеральных фаз элементов платиновой группы (далее — ЭПГ). Золото и серебро в видообразующих количествах или в виде существенных изоморфных примесей (твердых растворов) содержится в 12 из них (в табл. 2 выделены курсивом).

Главным концентратом золота в рудах всех месторождений и рудопроявлений являются Au-Ag-сплавы. Их состав меняется от высокопробного золота — 5 ат. % Ag до серебра, обогащенного золотом, — 60 ат. % Ag (табл. 3, рис. 3, *с*). Нередко Au-Ag-сплавы содержат заметное количество палладия. По данным 114 SEM/EDS-анализов, среднее содержание Pd в золотосеребряных сплавах составляет 1,6 мас. % при вариациях от 0 до 19,5 мас. %.

В относительно распространенных станнидах — атоките и паоловите — примесь золота 0,2–18,2 мас. % является обычной (табл. 3). В редком и не установленном как самостоятельный минеральный вид арсениде с предполагаемой формулой (Pd,Au)_{2+x}(As,Sn) концентрации Au стабильно достигают 5,3–6,5 мас. %. Достаточно редко Au в количестве до десятых долей процента (по массе) встречается в Pt-Pd-сульфидах, Pt-Pd-арсенидах, Pt-Pd-висмито-теллуридах.

Характер распределения серебра по сравнению с золотом существенно отличается. Концентраты серебра более многочисленны, сложны и разнообразны (в порядке распространенности — табл. 2, рис. 3, *а, б, в*): аргентопентландит Ag(Fe,Ni)₈S₈ (типичный аксессуарный минерал сульфидных руд); Au-Ag-сплавы с примесями Pd, Cu, Fe; сложные теллуриды серебра и палладия — сопчеит, теларгпалит и луккулайсваарит; редкий сульфид Ag и

Pd — колдвеллит и неуставленные фазы $Pd_5Ag(Pb,Bi)S_2(?)$ и $(Pd,Ag)_7Se_5(?)$. По данным микронзондового анализа, серебро в количестве от десятых долей до 1 мас. % встречается в Pt-Pd-сульфидах (брэггит, высокоците), Pt-Pd-арсенидах (палладоарсениде, стиллуотерите), до 3 мас. % — в Pt-Pd-висмута-теллуридах (меренскиите, котульските, мончеите).

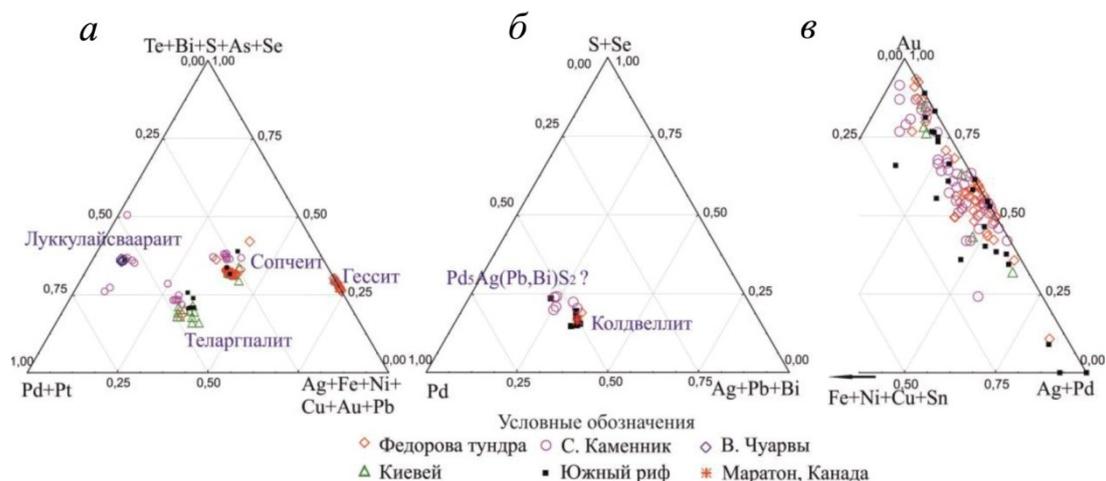


Рис. 3. Тройные диаграммы составов (ат. %) Ag-Pd-теллуридов (а), Ag-Pd-сульфидов (б) и Au-Ag-сплавов (в) из месторождений и рудопроявлений Федорово-Панского интрузивного комплекса и месторождения Маратон, Колдвелл, Канада (только для сульфидов)

Таблица 3

Микронзондовые и SEM/EDS(*) составы Au-Ag-содержащих минералов и маратонита из руд месторождений и рудопроявлений Федорово-Панского комплекса, мас. %

№ п/п	Минерал	S	Fe	Ni	Cu	Pd	Ag	Sn	Te	Pt	Au	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1*	Pd-Hg-Ag-сплав	—	—	—	—	36,75	11,46	—	—	1,29	—	100,0 ¹
2	Au-Pd-Ag-сплав	—	0,04	0,03	1,25	1,90	0,46	—	—	—	96,24	99,46
3		0,10	0,36	—	0,23	3,48	0,78	—	—	—	93,65	98,60
4		0,26	0,20	0,03	0,25	1,44	1,69	—	—	—	95,22	99,09
5*		—	0,22	—	0,33	6,46	1,50	—	—	—	91,49	100,0
6	Au-Ag-сплав	0,36	0,38	0,30	0,07	—	12,37	—	—	—	86,30	99,77
7		—	—	—	—	—	13,17	—	—	—	84,97	98,14
8		0,23	0,54	—	0,06	0,30	16,20	—	—	—	82,39	99,72
9		—	—	—	—	2,76	10,88	—	—	—	81,61	95,25
10		0,37	0,20	0,14	0,13	—	18,74	—	—	—	79,39	98,97
11		—	0,19	—	—	0,45	19,79	—	—	—	78,71	99,14
12		0,20	0,72	—	1,16	—	22,08	—	—	—	74,93	99,09
13*		0,35	1,22	—	0,64	—	32,30	—	—	—	65,48	99,99

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14*	Ag-Au-сплав	–	0,28	–	–	–	42,64	–	–	–	57,08	100,0
15	Паоловит	–	2,15	–	–	–	–	–	–	4,89	1,07	99,99
16*	Атокит	0,20	1,56	–	–	49,03	–	23,16	–	18,17	7,87	99,99
17*	Паларстанид	–	0,68	0,10	–	66,32	–	21,45	2,18	–	1,82	100,01 ²
18	Сопчеит	0,21	0,18	0,03	–	24,85	32,89	–	41,32	0,21	–	100,42 ³
19*		–	1,12	–	0,48	24,23	32,97	–	41,19	–	–	99,99
20*	Теларгпалит	–	0,70	0,17	0,65	43,31	24,82	–	24,57	1,57	–	100,01 ⁴
21*	Луккулайсваарит	–	0,32	–	–	52,10	6,97	–	40,61	–	–	100,0
22*		–	1,39	0,56	0,32	50,05	7,27	–	40,42	–	–	100,01
23*		–	0,08	0,36	–	50,53	7,65	–	40,21	1,17	–	100,0
24*	Атенеит	–	1,32	0,37	0,09	69,82	–	–	–	–	2,10	100,0 ⁵
25	Колдвеллит	4,72	0,18	–	–	56,85	35,76	–	–	–	–	97,51
26*		5,73	–	–	–	57,13	37,14	–	–	–	–	100,0
27	Pd ₅ Ag(Pb,Bi)S ₂ (?)	7,41	0,21	–	–	56,28	11,95	–	–	–	–	99,57 ⁶
28*	(Pd,Ag) ₇ Se ₅ (?)	0,34	1,16	0,62	–	61,40	4,90	–	–	–	–	100,0 ⁷
29	(Pd,Au) _{2+x} (As,Sn) (?)	0,04	0,14	–	0,26	69,79	–	3,61	0,15	0,11	6,46	100,36 ⁸
30*		–	0,64	0,12	–	68,73	–	11,88	–	–	5,33	100,0 ⁹
31*	Маратонит	–	–	–	–	79,25	–	–	–	–	–	100,0 ¹⁰
32*		–	–	–	–	77,28	–	–	–	2,86	–	100,0 ¹¹

Примечания: 1. Верхними индексами обозначены элементы, включенные в сумму, мас. %: 1 — Hg (50,5); 2 — As (7,08), Hg (0,38); 3 — As (0,73); 4 — Bi (2,83), Pb (1,39); 5 — As (18,02), Hg (8,28); 6 — Pb (23,48); 7 — Se (31,58); 8 — As (19,8); 9 — As (13,3); 10 — Hg (0,38), Pb (0,7), Ge (19,67); 11 — Ge (19,86).

2. Месторождения и рудопроявления (анализы): Федорова тундра — 1, 7, 9, 11, 15, 18, 26, 31, 32; Ю. Пешемпахк — 2; В. Чуарвы — 3, 4, 8, 21, 29; С. Каменник — 5, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 24, 28, 30; С. Пешемпахк — 6, 12; Предгорный — 10; Ю. Киевей — 23, 25, 27.

3. Прочерк — элемент не обнаружен.

Кроме указанных в табл. 2 и аргентопентландита, концентраторами серебра в составе руд являются также крайне редкие акантит Ag₂S, агвиларит Ag₄SeS, науманнит Ag₂Se и гессит Ag₂Te. Незначительная примесь (0,5 мас. % Ag) установлена в талкусите Tl₂(Cu,Fe)₄S₄.

Из-за крайней редкости и слабой изученности луккулайсваарит Pd₁₄Ag₂Te₉ и колдвеллит Pd₃Ag₂S из рудных зон Федорова-Панского комплекса заслуживают особого упоминания. Находка луккулайсваарита является второй в России и мире после его открытия в 2014 г. в интрузии Луккулайсваара в Карелии [9]. Первая и единственная до сих пор находка колдвеллита была сделана также в 2014 г. в металлургическом концентрате месторождения Маратон [10] (The Marathon Deposit, Coldwell Complex, Ontario, Canada). До его обнаружения в Южном рифе Западно-Панского массива в природной ассоциации этот минерал известен не был. В ассоциации с колдвеллитом впервые в России установлен природный германид палладия — маратонит Pd₂₅Ge₉, открытый в Канаде в 2016 г. там же, где и колдвеллит (The Marathon Deposit, Coldwell Complex, Ontario, Canada) [11].

В Федорово-Панском комплексе луккулайсваарит обнаружен в рудных габброноритах и анортозитах на месторождениях С. Каменник, В. Чуарвы и рудопроявлении Ю. Киевей. Образует выделения размерами до первых десятков микрометров в пентландит-пирротин-халькопиритовых и пентландит-миллерит-халькопиритовых (\pm борнит) сульфидных вкрапленниках в ассоциации с Pt-Fe-сплавом, брэггитом, висоцкитом, мончеитом, котульскитом, сопчеитом, теларгпалитом (рис. 4, f). Состав минерала близок к стехиометрии (рис. 3, a, табл. 3).

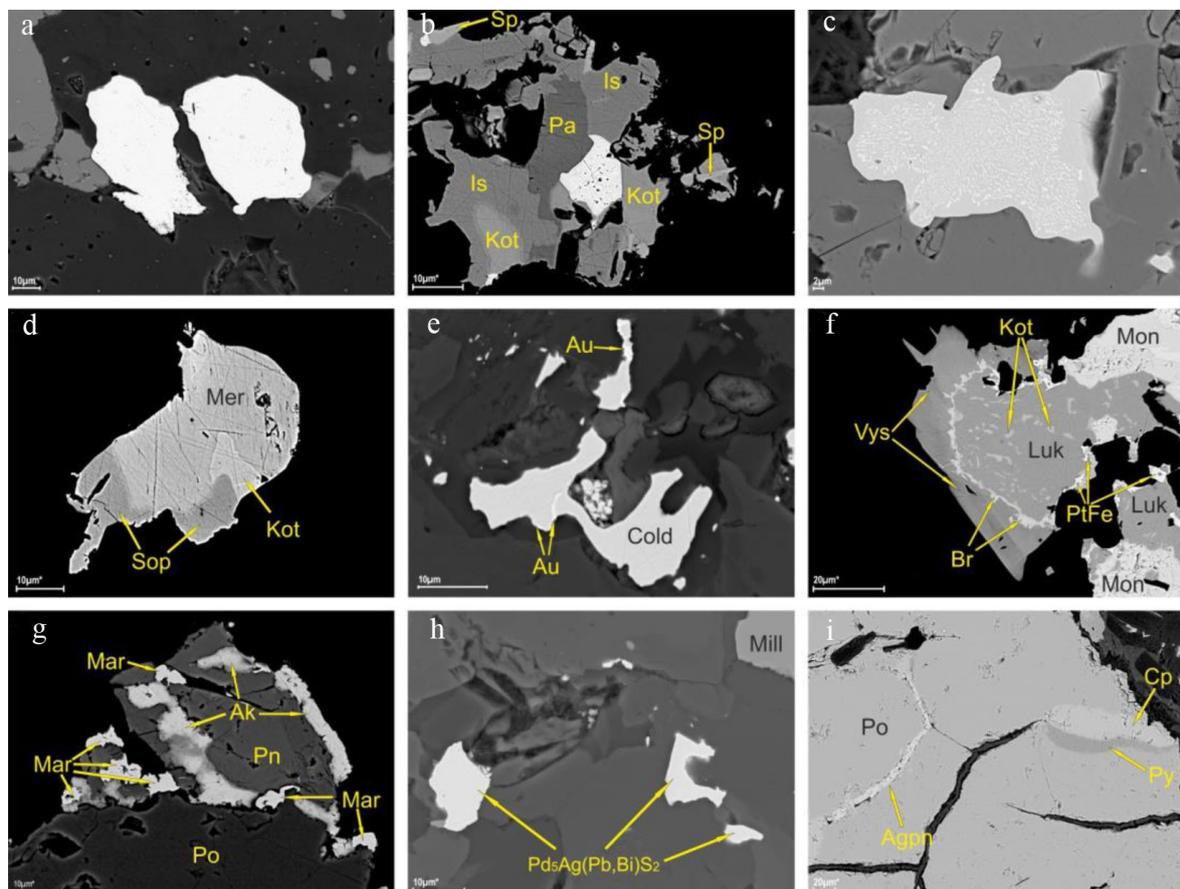


Рис. 4. Минералы-концентраты Au и Ag (морфология, микроассоциации, взаимоотношения, SEM-фото):
 а — выделения самородного золота (белое) среди неравномернoзернистых сульфидов (серое), рудный анортозит, Киевей; б — сложный комплексный сросток самородного золота (белое), котульскита (Kot), палладоарсенида (Pa), мертиита (Is) и сперрилита (Sp), рудное габбро, С. Каменник; в — тонкая эмульсионная структура распада твердого раствора самородного золота (белое) в паоловите (светло-серое), серое — пентландит, рудный габбронорит, Федорова тундра; д — сопчеит (Sop) в сростании с котульскитом (Kot) и меренскиитом (Mer), рудный габбронорит, С. Каменник; е — ксеноморфные зерна колдвеллита (Cold) с тонкими прожилковидными обособлениями золота (Au), рудный анортозит, Ю. Киевей; ф — комплексный сросток луккулайсваарита (Luk), мончеита (Mon), котульскита (Kot), брэггита (Br), висоцкита (Vys) и Pt-Fe-сплава (PtFe), рудный габбронорит, В. Чуарвы; г — прерывистые каймы, образованные ксеноморфными зернами маратонита (Mar) и агрегатами зерен акантита (Ak), вокруг Pd-содержащего пентландита (Pn), Po — пирротин, рудный габбронорит, Федорова тундра; h — группа зерен сложного сульфида Pd, Ag и Pb во вторичных силикатах вблизи миллеритового (Mill) вкрапленника, рудный анортозит, Ю. Киевей; i — каемчатое обособление аргентопентландита (Agpn) на границах зерен пирротина (Po), Py — пирит, Cp — халькопирит, рудный габбронорит, С. Каменник

Колдвеллит в рудных анортозитах рудопроявления Ю. Киевой образует несколько самостоятельных зерен сложной морфологии с включениями самородного золота (рис. 4, е) среди вторичных силикатов вблизи крупных сульфидных борнит-миллерит-халькопиритовых вкрапленников. Кроме уже названных, в ассоциации с ним обнаружены Pt-Fe-сплав, звягинцевит, высокоцит, сперрилит, тёрнроосит, мончеит, кейтконнит, сфалерит.

В образце рудного габбронорита с Федоровой тундры несколько зерен колдвеллита размером до 10–15 мкм обнаружены в сложной ассоциации с пирротинитом, троилитом, пентландитом, халькопиритом, кубанитом, аргентопентландитом, акантитом, Pt-содержащим таркианитом $(\text{Cu,Fe})(\text{Re,Mo})_4\text{S}_8$, Au, Ag-сплавами, хонгшитом, маратонитом, паоловитом, атоцитом, брэггитом, сперрилитом, мончеитом, котульскитом, соболевскитом, сопчеитом, теллуropалладинитом.

Химический состав колдвеллита изучен SEM/EDS- и микрозондовым методами, и в изученных образцах близок к теоретическому (табл. 3).

Маратонит из ассоциации с колдвеллитом показан на рис. 4, г. В другом образце руды (Федорова тундра) он образует мелкие (1–2 мкм) каемчатые обособления на краю мончеит-паоловитового сростка в халькопирите. Состав маратонита изучен SEM/EDS-методом и близок к теоретическому (табл. 3).

Морфологические особенности и микроассоциации других золотосеребряных минералов показаны на рис. 4. Минералы расположены как в сульфидах, так и в силикатах, особенно часто в сложных сростаниях с минералами ЭПГ (рис. 4, b, d, f), образуют зерна различной морфологии: ксено-, гипидиоморфные, каплевидные, просечки и каймы размерами от долей до первых сотен микрометров. Нередки также и структуры распада твердого раствора, например, самородного золота в станнидах Pd (рис. 4, c).

Обсуждение результатов и выводы

Макро- и микроморфологические особенности сульфидного Cu-Ni-платинометаллического оруденения в интрузиях Федорово-Панского комплекса, микроассоциации платиноидов с первично-магматическими сульфидами и силикатами, обилие структур распада твердых растворов в рудных минералах (пирротин-троилит, пламенеvidный пентландит, халькопирит-кубанит, скелетные выделения высокоцита в пентландите и др.) — все это признаки позднемагматического генезиса вкрапленных малосульфидных руд [1–3]. Равновесные генетические взаимоотношения золотосеребряных сплавов и других Au-Ag-содержащих минералов с вмещающими их сульфидами и платиноидами в большинстве случаев являются свидетельством того, что и золотосеребряные минералы, и минералы платиновых металлов принадлежат единой благороднометаллической минеральной ассоциации, сосуществующей с первично-магматическими вкрапленными Cu-Ni-Fe-сульфидами в краевых и рифовых зонах интрузий Федорово-Панского комплекса.

Ранее было показано [1, 2 и др.], что все главные минералы ЭПГ могли кристаллизоваться в высокотемпературных позднемагматических условиях (1100–500 °C) непосредственно из сульфидного расплава и остаточного газово-жидкого флюида после кристаллизации главных сульфидных минералов и одновременно с ними. Процессы относительно низкотемпературного (800–350 °C) постмагматического перераспределения благородных и цветных металлов, в т. ч. и золота с серебром, в режиме высокой активности летучих (Cl, H₂O, CO₂ и др.) в условиях

становления Федорово-Панских рудоносных интрузий проявились в очень ограниченных масштабах. Это существенно отличает рассмотренную минерализацию от Au-Ag-минерализации Норильских интрузий. Последняя, несмотря на схожесть минерального состава с Федорово-Панской, согласно современным данным [4, 12], формировалась в постмагматических низкотемпературных условиях (350–50 °С) в результате гидротермально-метасоматического и пневматолитового перераспределения Au и Ag из первично-магматических сульфидных руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве (Кольский полуостров, Россия) / А. У. Корчагин [и др.] // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42–51.
2. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 55–66.
3. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003.
4. Sluzhenikin S., Mokhov A. Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // Miner Deposita. 2015. 50: 465–492.
5. Особенности распределения благородных металлов в сульфидных парагенезисах месторождения Федорова тундра (Кольский полуостров) / А. Ф. Митрофанов [и др.] // ДАН. 2013. Т. 451, № 6. С. 676–679.
6. Золотосодержащие теллуриды платиноидов и палладистое золото в габброноритах Панского массива на Кольском полуострове / А. П. Кривенко [и др.] // ДАН. 1991. Т. 319, № 3. С. 725–729.
7. Минералы серебра в расслоенном интрузивном комплексе Федорово-Панских тундр, Кольский полуостров / М. З. Абзалов [и др.] // ДАН. 1993. Т. 329, № 4. С. 497–499.
8. Толстых Н. Д., Кривенко А. П. О составе теларгпалита // ДАН. Т. 341, № 5. 1995. С. 666–668.
9. Lukkulaivaaraite, Pd₁₄Ag₂Te₉, a new mineral from Lukkulaivaara intrusion, northern Russian Karelia, Russia / A. Vymazalová [et al.] // Mineralogical Magazine. 2014. December, Vol. 78(7). P. 1743–1754.
10. Coldwellite, Pd₃Ag₂S, a new mineral species from the Marathon deposit, Coldwell complex, Ontario, Canada / A. M. McDonald [et al.] // The Canadian Mineralogist. 2016. Vol. 53. P. 1–13.
11. Marathonite, IMA 2016-080 / A. M. McDonald [et al.] // CNMNC Newsletter. 2016. December, No. 34. P. 1320; Mineralogical Magazine: 80: 1315–1321.
12. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах / Э. М. Спиридонов [и др.] // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 445–476.

Сведения об авторах

Субботин Виктор Владимирович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологического института КНЦ РАН

E-mail: sub@geoksc.apatity.ru

Габов Дмитрий Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: gabov_da@mail.ru

Корчагин Алексей Урванович — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геологического института КНЦ РАН

E-mail: korchagin@geoksc.apatity.ru

Савченко Евгений Элланович — ведущий электроник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Victor V. Subbotin — PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: sub@geoksc.apatity.ru

Dmitriy A. Gabov — PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: gabov_da@mail.ru

Alexey U. Korchagin — PhD (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: korchagin@geoksc.apatity.ru

Eugene E. Savchenko — Leading Electronic Engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Золото и серебро в составе платинометаллических руд Федорово-Панского интрузивного расслоенного комплекса / *В. В. Субботин [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 53–65.

Reference

Subbotin Victor V., Gabov Dmitriy A., Korchagin Alexey U., Savchenko Eugene E. Gold and Silver in the Composition of PGE Ores of the Fedorov-Pana Layered Intrusive Complex. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 53–65 (In Russ.).