

УДК 553.241/.242(571.65)

ДИАРСЕНИДЫ И СУЛЬФОАРСЕНИДЫ Fe, Co, Ni, ПРОСТРАНСТВЕННО СВЯЗАННЫЕ С ЛЕВО-СЕЙМКАНСКИМ ГРАНИТНЫМ ПЛУТОНОМ (Магаданская область, Россия)

Савва Н. Е.

*ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан
E-mail: savva@neisri.ru*

Проведено изучение Ni-Co минерализации Лево-Сеймканского рудного узла. В ксенолитах габбро-диоритов из Лево-Сеймканского гранитного массива выявлена вкрапленная сульфоарсенидная и сульфоантимонидная минерализация с преобладанием сурьмянистого никелина и минералов ряда герсдорфит-крутовит с постоянной примесью, в герсдорфите Sb (от 1.1 до 2.4 мас. %); никелине (3.2–12.2 мас. %) в ассоциации с пирротинном. В новом рудопоявлении (басс. р. Армань, руч. Пугливый, 2 км от устья) в штокверке из кварц-хлоритовых прожилков, локализованных непосредственно в гранитах Лево-Сеймканского массива, установлена Co-As-Bi-Te-Au минерализация. Гнезда и вкрапленники рудных минералов представлены глаукодотом (Ni не более 3.28 мас. %), ассоциирующим с самородным Bi, висмутином, теллуrowисмутитом, хедлейитом и самородным Au. Выполнен сравнительный анализ Ni-Co минерализации вкрапленных руд в ксенолитах габбро-диоритов из гранитов Лево-Сеймканского массива, штокверка, локализованного в гранитах массива (выступ кровли в руч. Пугливый), а также из жил и прожилков в контактовых роговиках (месторождений Пугливое и Обход). Установлено, что для минерализации в гранитах и роговиках Ni минеральные фазы не так характерны, а Co/Ni отношение возрастает по мере удаления от Лево-Сеймканского массива, что объясняется более низкой миграционной способностью Ni по отношению к Co в ходе последовательной геохимической дифференциации.

Ключевые слова: Магаданская область, Лево-Сеймканский массив, Co-Ni-As-Bi минерализация, Fe-Ni-Co сульфоарсениды и сульфоантимониды.

DOI: 10.34078/1814-0998-2023-4-51-61

ВВЕДЕНИЕ

Диарсениды и сульфоарсениды Fe, Co, Ni широко распространены в природе и образуют сложные парагенетические соотношения. Они нередко ассоциируют с экономически важными минералами, такими как МПП и самородное золото. Промышленное значение имеют гидротермальные руды Co, связанные с многофазными гранитоидными массивами (Крутов, 1974; Богачева и др., 1978; Умитбаев, 1986; Гамянин, Лыхина, 2000; Горячев, 2011). К подобным интрузиям относится и раннемеловой (γK_1) Лево-Сеймканский массив амфибол-биотитовых гранитоидов, для которого характерно наличие других фаз, таких как диориты, монцодиориты, микропегматиты, гранит-порфиры.

В Лево-Сеймканском массиве и его обрамлении известны несколько **Co-As и Bi-Te рудопоявлений** (рис. 1), изучавшихся в 50-е годы про-

шлого столетия И. В. Деминым (1952 ф.). Помимо гидротермального Co-As-Bi парагенезиса, И. В. Деминым были также установлены Ni-As минералы неясной генетической природы. Сравнительно недавно впервые были детально изучены флюидные включения в продуктивном кварце месторождения Обход, расположенного в ороговикованных алевролитах (J_1) в экзоконтакте Лево-Сеймканского гранитного массива (Колова, Малиновский, 2015).

В настоящей статье, с учетом новых находок, в сравнительном плане рассмотрена Co-Ni-As минерализация в различном пространственном положении по отношению к гранитам Лево-Сеймканского массива (рис. 1): в ксенолитах габбро-диоритов (γK_1 ?) – *точка 1*, месторождение Co Обход по данным Е. Е. Коловой, М. А. Малиновского (2015) – *точка 2*; в гранитах Лево-Сеймканского массива (γK_1) – штокверк с Co минерализации в выступе кровли гранитов, руч. Пугливый – *точка 3*; жилы и минерализо-

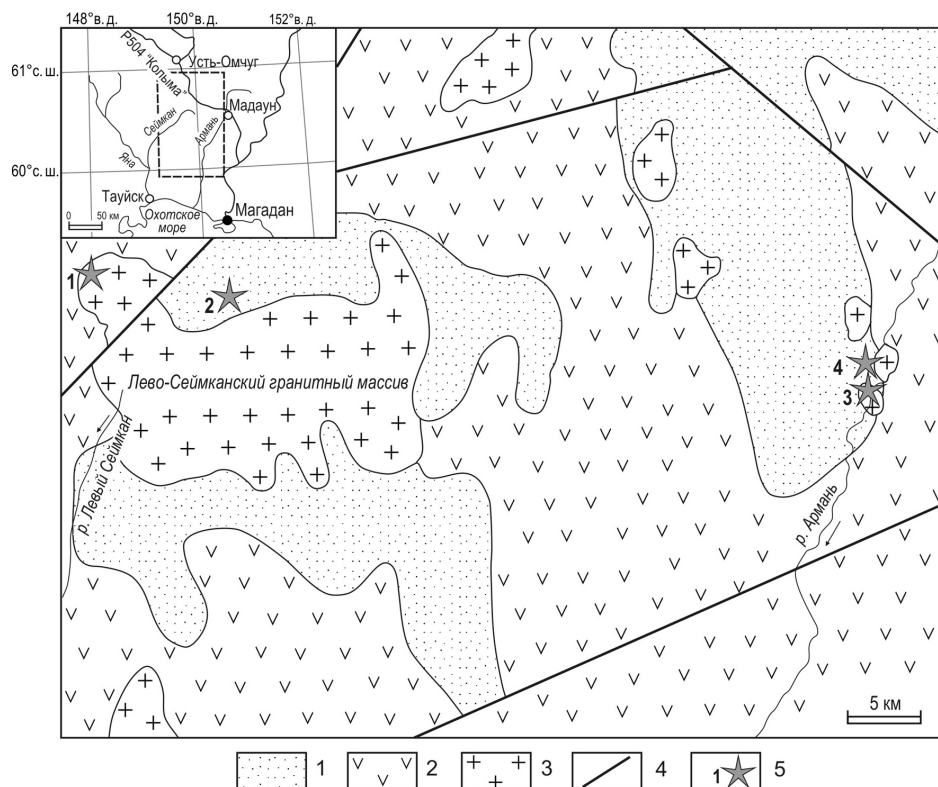


Рис. 1. Схема расположения месторождений и рудопроявлений с Co-Ni-As минерализацией вокруг Лево-Сеймканского гранитного массива, составленная с использованием схемы Е. Е. Коловой, М. А. Малиновского (2015): 1 – палеозойские и раннемезозойские терригенные образования верхоянского комплекса; 2 – мезозойские вулканогенные и вулканогенно-терригенные образования Охотско-Корякского орогенного пояса; 3 – раннемеловые гранитоиды сибердыкского комплекса; 4 – тектонические нарушения; 5 – места отбора образцов с Co-Ni минерализацией: 1 – минерализованные ксенолиты габбро-диоритов ($v\delta K_1$?), 2 – месторождение Co Обход (Колова, Малиновский, 2015), 3 – штокер с Co минерализации в выступе кровли гранитов, руч. Пугливый, 4 – жилы и минерализованные зоны дробления в ороговикованных алевролитах (J_1) Pb-Zn месторождения Пугливое, 5 – места расположения точек, где изучена минерализация. На врезке географическое положение площади исследования.

Fig. 1. Layout of objects with Co-Ni-As mineralization around the Levo-Seymkan granite massif compiled using the scheme by E. E. Kolova and M. A. Malinovsky (2015): 1 – Paleozoic and Early Mesozoic terrigenous formations of the Verkhoyansk complex; 2 – Mesozoic volcanogenic and volcanogenic-terrigenous formations of the Okhotsk-Koryak orogenic belt; 3 – Early Cretaceous granitoids of the Siberdyk complex; 4 – tectonic disturbances; 5 – sampling sites of Co-Ni mineralization: 1 – mineralized xenoliths of gabbro-diorites ($v\delta K_1$?), 2 – Obkhod Co deposit (Kolova, Malinovsky, 2015), 3 – stockwork with Co mineralization in the granite roof outshot, Puglivy Creek, 4 – veins and mineralized crushing zones of hornfelsed aleurolites (J_1) Pb-Zn, Puglivoye deposit, 5 – locations of points where mineralization has been studied. Inset: geographical position of the research area.

ванные зоны дробления в ороговикованных алевролитах (J_1) Pb-Zn месторождения Пугливое – точка 4.

Целью исследования было выделение минеральных комплексов с участием Co-Ni арсенидов и сульфоарсенидов на основе изучения новых точек Co-Ni оруденения и проведение сравнительного анализа Ni-Co минерализации во вкрапленных рудах ксенолитов габбро-диоритов из гранитов Лево-Сеймканского массива; штокерка, локализованного непосредственно в гранитах массива (выступ кровли в руч. Пугливый); из жил и прожилков в контактовых роговиках (месторождение Пугливое и месторождение Обход), а также обсуждение вопроса о возможном

дополнительном привносе Ni и Co из осадочных толщ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рудные образцы для минералогических исследований были отобраны автором в ходе полевых маршрутов разных лет. Минеральный состав и минеральные парагенезисы изучены в отраженном свете с использованием оптического микроскопа Axioplan Imaging фирмы Carl Zeiss. Химический состав минералов и руд определялся в Северо-Восточном центре коллективного пользования СВКНИИ ДВО РАН рентгеновским энергодисперсионным микроанализом на приборе QEMSCAN Esprit system в режиме скани-

рующего микроскопа (EVO-50). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка от 14 до 120 пА, размер излучающей области – 4 мкм, сигнал детектирования – SE (вторичные электроны), с использованием стандартного метода P/B-ZAF, аналитик Е. М. Горячева (анализы пересчитаны на 100 мас. %, граничные значения сумм в анализах, принимаемых в расчет как достоверные, – 89–101 мас. %). Концентрации химических элементов в рудах определены эмиссионным количественным спектральным анализом на спектрографе УСА-5 с полуавтоматической просыпкой по разработанной методике «ЭКСА», аналитик Т. П. Козырева.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ксенолит габбро-диоритов $\nu\delta K_1$ с мелкой рудной вкрапленностью (размером $7 \times 5 \times 4$ см) отобран автором из делювия гранитоидов Лево-

Сейманского массива, в правом борту руч. Клин ($60^\circ 50'$ с. ш., $149^\circ 56'$ в. д.; басс. р. Левый Сейман). Ксенолит представлен породой черного цвета, метасоматически измененной (карбонат-хлорит-альбитовые изменения), и содержит равномерно рассеянную рудную вкрапленность размером 0.5–0.7 мм (рис. 2, а).

Состав вкрапленников исследован в аншлифах (рис. 2, б–е) и микрорентгеноспектральным анализом (табл. 1). Вкрапленники приурочены к массе хлоритизированных темноцветных минералов. В их составе установлены пирротин в ассоциации с сурьмянистым никелином (Sb 3.2–12.2 мас. %) и Sb-содержащими минералами ряда герсдорфит-крутовит (Sb 0.00–4.89 мас. %).

Никелин – представлен мелкими зернами, гипидиоморфных и ксеноморфных очертаний, с характерной розовой окраской, сростается с герсдорфитом (рис. 2, з) и крутовитом (рис. 2, в, д).

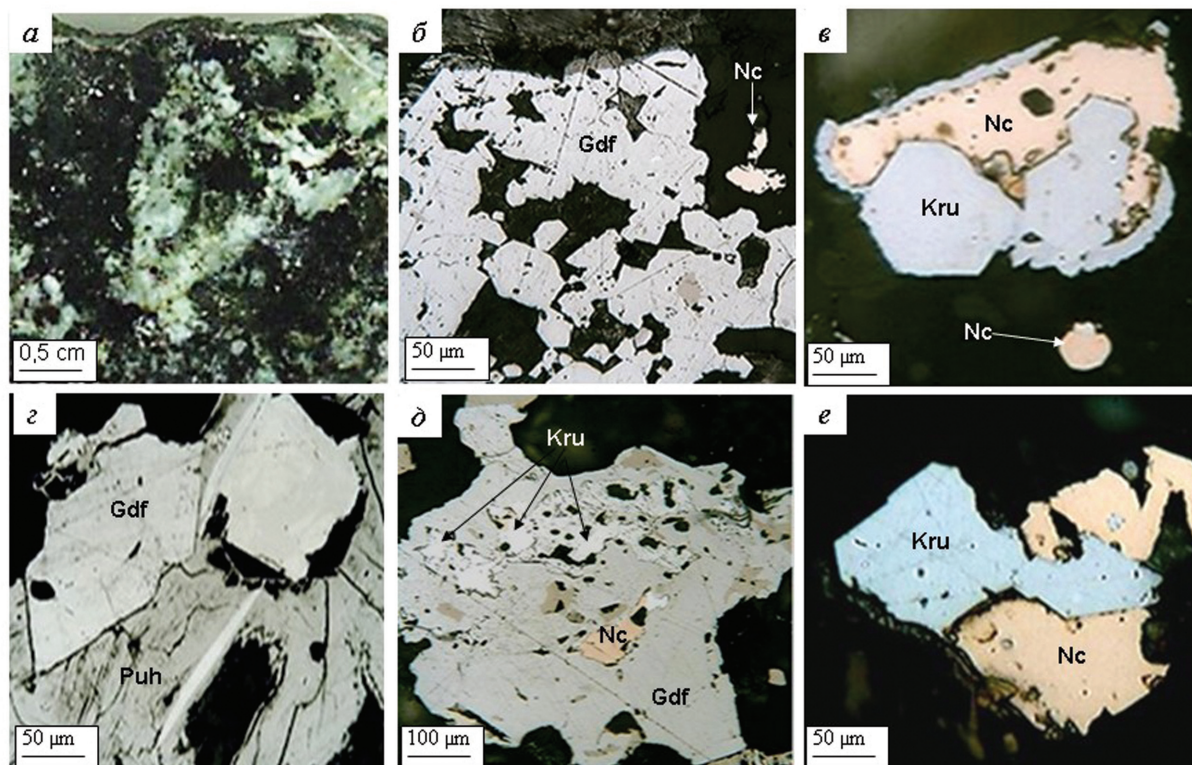


Рис. 2. Минеральные ассоциации вкрапленных руд из ксенолитов габбро-диоритов: а – общий вид ксенолита габбро-диоритов – метасоматически измененная порода с пятнами хлорит-карбонатного состава и рудными вкрапленниками (белые точки); б – скопление мелкокристаллического герсдорфита в хлоритизированном амфиболе и единичный вкрапленник никелина; в – никелин (розовое) в сростании с идиоморфными кристаллами крутовита; з – сростание герсдорфита с пирротин (пирротин претерпел изменения); д – сложное сростание герсдорфита с крутовитом (более светлая фаза) с мелкими включениями никелина и пирротина; е – сростание никелина (розовое) с крутовитом.

Fig. 2. Mineral associations of dispersed ores from gabbro-diorite xenoliths: а – general appearance of the gabbro-diorite xenolith – metasomatically altered rock with spots of the chlorite-carbonate composition and ore inclusions (white dots); б – accumulation of fine-crystalline gersdorffite in chloritized amphibole and a single nickeline inclusionary; в – nickel (pink) intergrown with idiomorphic crystals of krutovite; з – complex intergrowth of gersdorffite with pyrrhotite (pyrrhotite has undergone changes); д – complex intergrowth of gersdorffite with krutovite (lighter phase) with small inclusions of nickeline and pyrrhotite; е – intergrowth of nickeline (pink) with krutovite.

Герсдорфит – образует скопления до 0.8 мм мелких идиоморфных кристаллов размером 0.1 мм в хлоритизированных темноцветных минералах (рис. 2, б), а также скрытокристаллический минеральный агрегат с многочисленными включениями крутовита (более светлое), редкими включениями пирротина и никелина – розовое (рис. 2, д). Герсдорфит образует также идиоморфные включения в пирротине (рис. 2, з). Стехиометричный герсдорфит редок, для него характерны широкие вариации соотношений As и S, во многих образцах мышьяк преобладает над серой, вплоть до крутовита (NiAs_2) (Боришанская и др., 1981; Спиридонов, Чвилёва, 1995).

Крутовит – ассоциирует с никелином (рис. 2, в, е) и герсдорфитом (рис. 2, д), отличается от герсдорфита более высоким отражением.

Пирротин – можно отнести к ранним (возможно, магматическим? минералам), т. к. он претерпел гидротермальные изменения вместе с габбро-диоритом (возможно, повышение фугитивности S), приобрел пятнистую неравномерную ок-

раску и псевдопластинчатую текстуру (рис. 2, з), в отдельных случаях он изменен до марказито-подобного вида. Размеры выделений пирротина достигают 1.2 мм. Герсдорфит корродирует пирротин. По составу пирротин близок к стехиометрическому, встречена также его мышьяковистая разновидность (табл. 1).

Штокверк в правом борту руч. Пугливый, басс. р. Армань ($60^\circ 37'$ с. ш., $151^\circ 55'$ в. д.) локализован в гранитах и частично в роговиках ближнего экзоконтакта Лево-Сеймканского массива (рис. 1). Рудная, интенсивно окисленная (до эритрина) минерализация приурочена к штокверку кварц-хлоритовых прожилков (мощностью до 4 см). Подобные выходы гранитов и прожилки с эритрином ранее отмечались И. В. Деминым вблизи Мадаунского моста через р. Армань. Он относил эти выходы к отрогам Лево-Сеймканского гранитного массива. Нами в штокверке (руч. Пугливый) установлена Co-As и Au-Ag-Te-Bi минерализация (рис. 3, табл. 2). Гнездовые скопления рудных минералов пред-

Таблица 1. Химический состав минералов во вкрапленных рудах из ксенолитов габбро-диоритов Лево-Сеймканского гранитного массива

Table 1. Chemical composition of minerals in disseminated ores of the gabbro-diorite xenoliths from the Levo-Seymkan granite massif

Концентрация элемента, масс. %						Формульные коэффициенты					
S	Fe	Co	Ni	As	Sb	S	Fe	Co	Ni	As	Sb
<i>Никелин (Fe. Co. Ni) (As. Sb) – в расчете на 2 атома</i>											
0.00	0.68	0.00	41.78	54.96	3.58	–	0.016	–	0.957	0.980	0.050
0.00	1.00	0.00	45.82	49.89	3.28	–	0.024	–	1.047	0.990	0.040
0.00	1.59	0.00	42.88	43.30	12.23	–	0.040	–	1.016	0.896	0.041
0.00	1.24	1.55	43.21	52.95	1.05	–	0.032	–	0.999	0.845	0.144
0.00	1.79	0.00	42.60	51.47	4.14	–	0.043	–	0.981	0.964	0.011
0.00	1.66	0.00	45.68	47.63	5.03	–	0.042	–	1.048	0.935	0.050
0.00	2.64	0.00	41.05	45.88	10.13	–	0.066	–	0.970	0.865	0.064
0.00	1.12	0.00	45.84	49.89	3.28	–	0.027	–	1.045	0.854	0.123
0.00	1.23	0.00	41.09	54.02	3.65	–	0.030	–	0.955	0.895	0.043
<i>Ряд герсдорфит-крутовит (Fe. Co. Ni) (As. Sb. S)₂ – в расчете на 3 атома</i>											
2.51	1.94	1.10	25.75	61.31	4.89	0.16	0.073	0.039	0.921	1.718	0.080
1.91	2.71	0.00	25.83	65.27	4.23	0.12	0.100	0.000	0.902	1.797	0.073
10.37	0.85	0.00	29.12	57.40	2.25	0.599	0.028	–	0.919	1.419	0.034
15.40	9.51	0.00	23.06	50.33	1.70	0.833	0.296	–	0.681	1.165	0.024
18.58	9.49	0.00	25.83	44.84	1.10	0.968	0.284	–	0.735	0.999	0.015
15.42	2.23	0.00	32.61	43.63	2.40	0.860	0.071	–	0.993	1.040	0.035
20.58	6.90	11.55	16.53	44.44	0.00	1.049	0.202	0.320	0.460	0.969	–
16.38	10.17	0.00	24.74	46.58	2.14	0.870	0.312	–	0.721	1.063	0.030
17.87	8.00	11.05	15.29	47.79	0.00	0.936	0.241	0.315	0.437	1.071	–
18.21	7.69	11.22	15.72	47.15	0.00	0.950	0.230	0.319	0.448	1.053	–
17.83	7.12	14.03	12.69	48.33	0.00	0.936	0.215	0.401	0.364	1.086	–
18.56	6.60	12.00	15.81	47.03	0.00	0.966	0.197	0.340	0.449	1.048	–
<i>Пирротин Fe. As</i>											
40.41	59.59	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08	0.917	–	–	–	–
39.80	60.20	0.00	0.00	0.00	0.00	1.07	0.929	–	–	–	–
38.39	58.96	0.00	0.00	2.65	0.00	1.06	0.937	–	–	–	–

ставлены в прожилках глаукотом, хедлейитом и теллуrowисмутитом в ассоциации с самородным золотом, а также самородным висмутом, тесно ассоциирующим с висмутином.

Глаукотом – широко развит в кварц-хлоритовых прожилках. Он образует скопления (до 3 мм) гипидиоморфных зерен. Минерал катклазирован, по трещинам отлагаются *самородный висмут и висмутин* (рис. 3, а–б). По составу глаукотом в большинстве случаев безникелистый (Ni – 0.00–3.82 мас. %) (табл. 2).

Теллуриды Bi – хедлейит и теллуrowисмутит тесно срastaются, близки по оптическим свойствам. Теллуrowисмутит имеет характерную пластинчатую отдельность (рис. 3, в).

Самородный висмут тесно срastaется с висмутином и содержит постоянную примесь Te (1.28–2.53 мас. %).

Самородное золото – образует гипидиоморфные включения размером 0.1–0.3 мм в агрегате теллуридов Bi. Пробность самородного золота – 860 ‰ (табл. 2).

Pb-Zn месторождение Пугливое расположено в 2 км севернее обнажения с Co-As и Au-Ag-Te-Bi минерализацией в штокверке, рассмотренном выше (рис. 1). Месторождение локализовано в ороговикованных осадочных породах нижней юры, прорванных штоками и дайками риолитов хольчанского комплекса. Рудные тела представлены кварц-хлорит-сульфидными жилами и минерализованными зонами дробления северо-восточного простирания, протяженностью до 500 м. Часть жил вскрыта канавами и скважина-

ми. Детальные поиски проводились В. П. Капаниным, Ю. А. Павловой (1978. 81ф). («Мшисто-Кандычанский отряд»). По трем хлорит-кварц-сульфидным жилам участка Пугливый были подсчитаны прогнозные ресурсы по категории P2 – Au, Ag, Cu, Zn, Pb, As. Помимо основных компонентов в отдельных штучных пробах установлены Sb до 2.76 %, Bi 1–3 %, Co 0.5–1 %, Cd 0.05 %, Mn > 1 %. (Государственная..., 2001).

В ходе маршрута 2010 г. нами было отобрано и проанализировано спектральным количественным анализом «ЭКСА» 8 рудных проб. Ниже, в сравнительном плане, приводятся результаты анализов для участков, различных по отношению к Лево-Сеймканскому массиву (см. рис. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все изученные образцы пространственно связаны с Лево-Сеймканским гранитным массивом. Коллекция образцов с Ni-Co-As минерализацией условно подразделена на 3 группы по составу вмещающих пород: *I группа* – ксенолиты габбро-диоритового состава из гранитов – более ранняя фаза по отношению к Лево-Сеймканским гранитам → *II группа* – кобальтоносные прожилки, локализованные в штокверке выступа кровли этих гранитов, → *III группа* – гидротермальная Со минерализация в роговиках, в экзоконтакте гранитов. В данном разделе приведены результаты сравнительного анализа минеральных парагенезисов по выделенным группам.

I группа. Вкрапленные руды в ксенолитах габбро-диоритов характеризуются наличием Sb в

Таблица 2. Химический состав рудных минералов из кварц-хлоритовых прожилков штокверка в выступе кровли гранитоидов Лево-Сеймканского массива (руч. Пугливый, басс. р. Армань)

Table 2. Chemical composition of ore minerals from quartz-chlorite stockwork veins in the roof outshot of the Levo-Seymkan massif granitoids (Puglivy Creek, Arman River basin)

Концентрация элемента, масс. %					Формульные коэффициенты				
S	Fe	Co	Ni	As	S	Fe	Co	Ni	As
<i>Глаукотом (Fe, Co, Ni) (As, S)₂</i>									
21.09	1.82	36.35	0.00	40.74	1.066	0.053	1.000	–	0.881
23.10	2.00	34.48	0.00	40.42	1.149	0.057	0.933	–	0.861
22.16	5.98	36.50	3.82	31.53	1.089	0.169	0.976	0.093	0.663
<i>Хедлейит Bi₂Te?</i>									
S	Fe	Bi	As	Te	S	Fe	Bi	As	Te
0.00	0.00	74.35	0.00	25.70	–	–	1.924	–	1.076
0.00	0.00	73.40	0.00	26.56	–	–	1.885	–	1.115
<i>Самородный висмут</i>					<i>Самородное золото</i>				
S	Te	Bi	Fe	As	S	Ag	Au	Bi	Cu
0.00	1.28	96.01	0.00	0.00	0.00	14.01	85.99	0.00	0.00
0.00	1.53	98.10	0.00	0.00					
0.00	1.50	97.25	1.29	0.00					
0.00	1.51	95.14	0.00	0.00					
0.00	2.53	97.47	0.00	0.00					

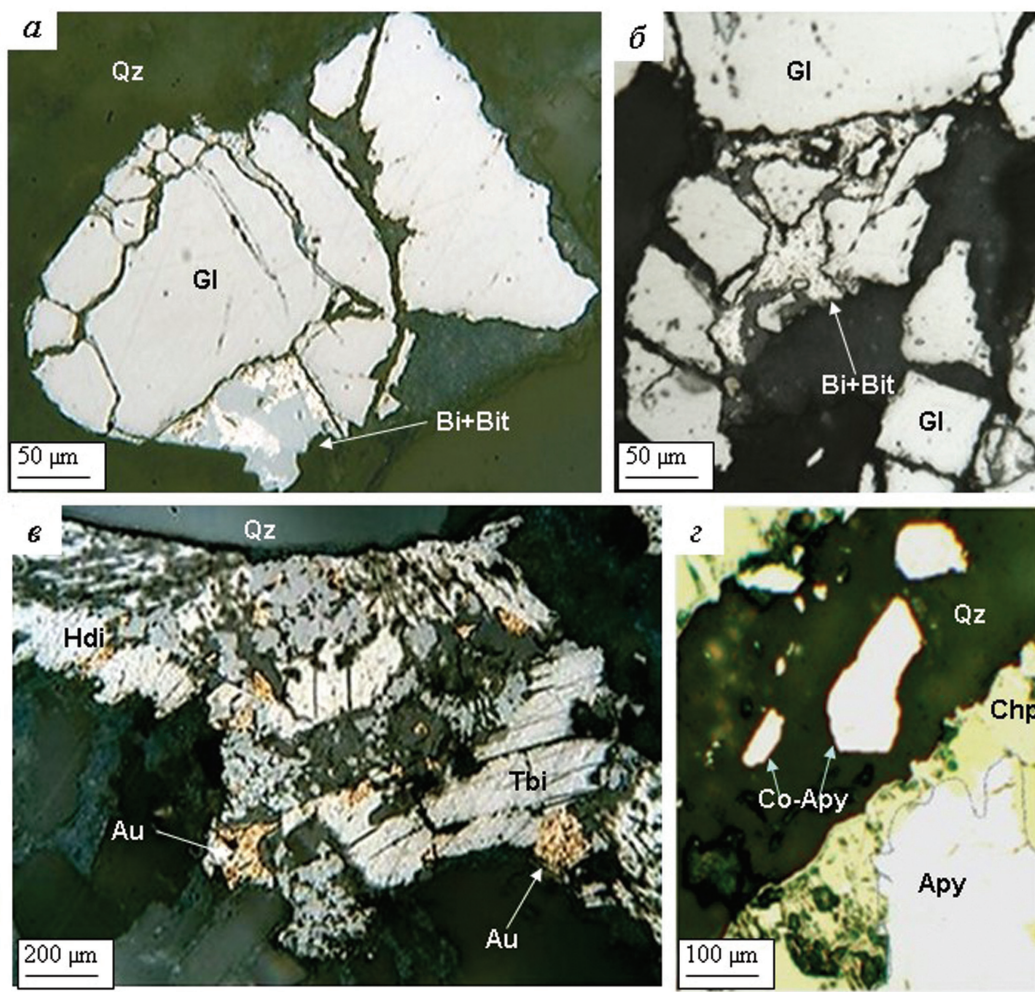


Рис. 3. Co-As рудные минералы в штоковке, в обрывах руч. Пугливый (а–в) и богатая Co минерализация в Pb-Zn рудах месторождения Пугливое (з): а–б – гипидиоморфный катаклазированный кристалл глаукодота, по трещинам развит висмут-висмутиновый минеральный агрегат; в – интерстициальное выделение в кварце с теллуридно-висмутовой минерализацией и самородным золотом; з – прожилок кварца в сульфидном минеральном агрегате с кристаллами кобальтистого арсенопирита и выделение халькопирита, ассоциирующее с арсенопиритом.

Fig. 3. Co-As mineralization in the stockwork of the Puglivy Creek brinks (а–в) and rich Co mineralization in the Pb-Zn ores of the Puglivoye deposit (з): а–б – hypidiomorphic cataclased glaucodote crystal, with the bismuth-bismuth mineral aggregate developed along the cracks; в – interstitial separation in quartz with the telluride-bismuth mineralization and native gold; з – quartz veinlet in a sulfide mineral aggregate with cobaltous arsenopyrite crystals and a chalcopyrite isolation associated with arsenopyrite.

Co-Ni арсенидах, появлением крутовита в сростании с Sb-никелином и Sb-герсдорфитом, что показывает определенное сходство с минеральными комплексами норильских руд (Гриценко, Спиридонов, 2006; Спиридонов, Гриценко, 2009). Для руд раннего этапа характерно наиболее низкое Co/Ni отношение по сравнению с поздними этапами (табл. 3, рис. 4).

Габбро-диориты в ксенолитах подверглись хлорит-карбонат-альбитовым метасоматическим изменениям при становлении Лево-Сеймканских амфибол-биотитовых лейкократовых субщелочных гранитов. Гидротермально изменен и вкрапленный пирротин, ассоциирующий с герсдорфитом. Минерал приобретает пятнистый вид

и псевдопластинчатую текстуру (рис. 2, з), так называемый «промежуточный продукт», а в отдельных случаях пирротин изменен до марказитоподобного агрегата. В некоторых выделениях пирротина отмечаются пористые участки (0.1–0.4 мм), в которых наряду с Co, Ni, Fe, As, S установлены Pb (55 мас. %) или Bi (43 мас. %) с Te (2.5 мас. %). Среди вкрапленников в габбро-диорите присутствуют также единичные ксеноморфные выделения халькопирита (0.07–0.2 мм), не ассоциирующие с Co, Ni, Fe арсенидами и сульфоарсенидами.

II группа. Это Co-As минерализация в штоковке выступа кровли Лево-Сеймканских гранитов, представленная глаукодотом (табл. 2), кото-

Таблица 3. Концентрации основных компонентов в рудных проявлениях Лево-Сеймканского узла по данным количественного спектрального анализа в г/т (Fe в %)

Table 3. Concentrations of the basic components in ores from the Levo-Seimkan cluster occurrences, according to the quantitative spectral analysis data, g/t (Fe in %)

Химический элемент	Ксенолит габбро-диоритов из гранитов Лево-Сеймканского массива	Штокверк в выступе кровли Лево-Сеймканского гранитного плутона (руч. Пугливый, басс. р. Армань)	Pb-Zn месторождение Пугливое (массивная колчеданная руда) в надынtruзивных роговиках	Месторождение Обход в ороговикованных алевролитах (рудная проба из отвалов штольни № 1)
	Концентрация элементов, г/т			
Co	117.07	45.6	66.1	63.75
Ni	138.54	41.85	8.58	11.64
Pb	12.52	570.83	2234.4	93.02
Zn	141.08	582.58	3891.2	1122.14
Bi	11.28	14.89	162.06	8.49
As	469.63	2009.6	4863.9	568.3
Sb	3.45	33.37	н. о.	н. о.
Ag	0.927	6.76	13.6	1.28
Cu	79.98	212.73	512.26	9.62
Sn	13.07	83.25	47.63	22.03
Cr	116.04	111.23	338.48	54.4
Ca	10.14	6.19	1.66	0.916
Fe, %	9.72	7.99	6.13	3.84
Co/Ni	0.84	1.09	7.69	5.48 (2.1) *

* Данные Е. Е. Коловой, М. А. Малиновского (2015).

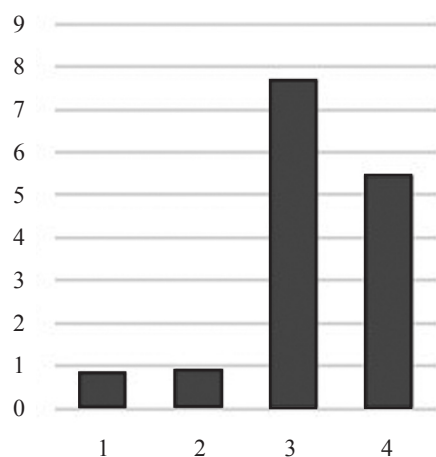


Рис. 4. Соотношение Co/Ni в рудопроявлениях Лево-Сеймканского узла: по оси абсцисс 1 – вкрапленные руды в ксенолите габбро-диоритов из гранита; 2 – оруденение в граните; 3 – Pb-Zn оруденение в роговиках (Пугливое); 4 – Co-Bi оруденение (Обход); по оси ординат – величина соотношения Co/Ni.

Fig. 4. Co/Ni ratio in ore occurrences of the Levo-Seimkan cluster. Horizontal axis: 1 – dispersed ores in xenolith of gabbro-diorites from granite; 2 – mineralization in granite; 3 – Pb-Zn mineralization in hornfels (Puglivoye); 4 – Co-Bi mineralization (Obkhod). Vertical axis: Co/Ni ratio.

рый катаклазирован и по трещинам развивается Bi минерализации (самородный висмут + висмутин) (рис. 3, а–б). Глаукоdot частично подвергся окислению с образованием эритрина. Несколько обособленно отмечаются выделения теллуридов висмута (теллуrowисмутит, хедлейит) с включениями самородных Au и Bi. Кроме того, в прожилках встречаются небольшие (1–2 мм) гнездовые скопления интенсивно окисленной Pb-Zn минерализации. В целом в этой группе может быть выделена трехстадийная минерализация: 1 – массивные сульфиды (Pb-Zn-Fe) → 2 – глаукоdotовая → катаклиз → 3 – бессернистые минералы Te + самородные Au и Bi + висмутин.

Судя по составу минералов, отложение поздней ассоциации сопровождается значительным снижением фугитивности S.

III группа. Минералы этой группы образовались одновременно со II группой, но не в гранитах, а в роговиках по юрским алевролитам – Co-Au месторождения Обход и кобальтсодержащие сульфидно-полиметаллические руды месторождения Пугливое.

Сравнительный анализ (табл. 4) показывает, что в ранних вкрапленных рудах в ксенолитах в Co-Ni арсенидах и сульфоарсенидах Ni преобладает над Co, а в гидротермальных образованиях непосредственно в гранитах и в роговиках – в ру-

Таблица 4. Особенности Co-Ni-As и сульфоарсенидной минерализации в зависимости от состава вмещающих пород

Table 4. Features of the Co-Ni-As and the sulfoarsenide mineralization depending on the host rocks composition

Характеристики (рудопоявление, месторождение)	Ксенолит габбро-диоритов из гранитов Лево-Сеймканского массива	Штокверк в выступе кровли Лево-Сеймканского гранитного плутона (руч. Пугливый, басс. р. Армань)	Pb-Zn месторождение Пугливое (массивная колчеданная руда) в надынtruзивных роговиках	Месторождение Обход в ороговикованных алевролитах (рудная проба из отвалов штольни № 1)
Возраст вмещающих оруденение пород	$v\delta K_1?$	γK_1	J_1	J_1
Гидротермальные изменения	Хлорит-карбонат-альбитовые	Хлоритизация	Ороговикование	Ороговикование
Морфология рудных образований	Вкрапленники < 1 % (0.3–1.5 мм)	Кварц-хлоритовые прожилки – 1–3 см с гнездовыми скоплениями (1–3 мм) рудных минералов	Кварцевые, кварц-хлоритовые, хлорит-кварц-сульфидные жилы мощностью от 1.2 до 4 м	Кварц-хлоритовые жилы 0.5–2.5 м и зоны прожилкования с кобальтином
Геохимический спектр рудных элементов	Fe, Co, Ni, As, Sb (Pb, Bi)	As, Co, Cu, Pb, Zn, Bi, Te, Au, Ag	As, Fe, Pb, Zn, Cu, Sn, Sb, Bi, Co, Au, Ag	As, Cu, Mo, Co, Ni, Pb, Zn, Fe, Bi, Sn, Ag, Au
Co-Ni минерализация	Никелин (Sb – 3.5–13.0 мас. %), Sb-содержащие герсдорфит-крутовит	Глаукоdot и Co-содержащий арсенопирит	Co-содержащий арсенопирит	Кобальтин (Ni-содержащий), арсенопирит (Co, Ni-содержащий)*
Сопутствующая минерализация	Пирротин, халькопирит, пентландит?	Халькопирит, самородный висмут + висмутин, жозеит Б, самородное золото	Пирротин, пирит, галенит, сфалерит	Галенит, сфалерит, висмутин, самородные Bi, и Au*
Co/Ni (данные спектрального анализа)	0.84	1.09	7.69	5.48 (2.1) *

* Данные Е. Е. Коловой, М. А. Малиновского (2015).

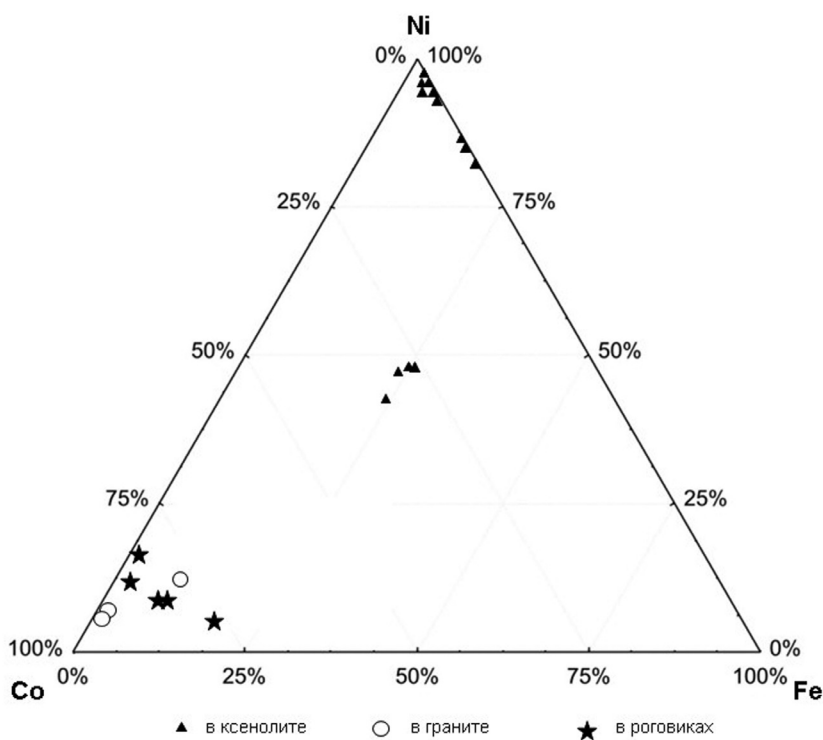


Рис. 5. Распределение Fe, Co, Ni в рудных образованиях разных групп на диаграмме Fe-Co-Ni.

Fig. 5. Distribution of Fe, Co, and Ni in ore formations from different groups on the Fe-Co-Ni diagram.

дах преобладает Co (кобальтин, глаукоdot), что отчетливо видно на тройной диаграмме Fe-Ni-Co (рис. 5). В массивных сульфидных рудах месторождения Пугливый Co-содержащий арсенопирит также отлагается позже полиметаллических руд.

Перераспределение рудообразующих элементов в ходе гидротермального процесса при переносе их во флюидах с преобладанием углеводородов в качестве основного окислительно-восстановительного агента зависит от сульфидности руд (Klemm, 1965; Hem, Makovsky, 2004; Kreißl et al., 2018). Во флюидах месторождения Обход в составе газовых фаз установлены углеводороды CO₂ и CH₄ (Колова, Малиновский, 2015). Гидротермальные жилы, содержащие Ag, Co, Ni, Bi, As и богатые сульфидами, отличаются ранним отложением сульфидов полиметаллов по отношению к Co-Ni-Fe сульфоарсенидам.

Можно предположить также, что повышение концентрации Co в жилах по сравнению с вкрапленными и штокверковыми рудами связано с его дополнительной мобилизацией из вмещающих осадочных пород. Тонко-вкрапленная рассеянная Ni-Co минерализация характерна для осадочных толщ (J₁) Омчакского рудного узла (Ворошин и др., 1989), для алевролитов (J₁) на месторождении Дегдекан (Савва, Парфенов, 2002), в черносланцевых толщах Юкона (Orberger et al., 2003).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что в ксенолитах габбро-диоритов из Лево-Сеймканского гранитного плутона выявлена вкрапленная сульфоарсенидная и сульфоантимонидная минерализация с преобладанием сурьмянистого никелина и минералов ряда герсдорфит-крутовит с постоянной примесью, в герсдорфите Sb (1.1 до 2.4 мас. %), никелине (3.2–12.2 мас. %) в ассоциации с пирротинном.

Проведено изучение нового проявления Co-As-Bi-Te-Au минерализации (басс. р. Армань, руч. Пугливый, 2 км от устья) в штокверке из кварц-хлоритовых прожилков, локализованных непосредственно в гранитах Лево-Сеймканского массива. Установлено, что гнезда и вкрапленники рудных минералов представлены глаукоdotом (Ni не более 3.28 мас. %), ассоциирующим с самородным Bi, висмутином, теллуrowисмутитом, хедлейитом и самородным Au.

Выполнен сравнительный анализ Ni-Co минерализации вкрапленных руд в ксенолитах габбро-диоритов из гранитов Лево-Сеймканского массива, штокверка, локализованного в гранитах массива (выступ кровли в руч. Пугливый), а также из жил и прожилков в контактовых роговиках (месторождений Пугливое и Обход).

Полученные новые данные о Fe-Ni-Co арсенидной и сульфоарсенидной минерализации позволяют говорить:

о более раннем источнике существенно Ni минерализации габбро-диоритов, образующих ксенолиты в Лево-Сеймканских гранитах, по составу эта вкрапленная минерализация имеет большое сходство с некоторыми норильскими минеральными парагенезисами;

о подтверждении на примере гидротермального рудообразования, связанного с Лево-Сеймканскими гранитами, более низкой в геохимическом плане миграционной способности Ni по отношению к Co, что в ходе геохимической дифференциации при рудообразовании привело к концентрированию Co, в более значительной степени, чем Ni;

о возможном дополнительном привносе Co, мобилизованного из вмещающих осадочных пород.

При проведении последующих работ в данном районе вопрос о рассеянной Ni-Co минерализации в осадочных толщах должен быть дополнительно изучен.

ЛИТЕРАТУРА

- Богачева Е. Н., Горбунов Е. З., Дорохин И. В., Дружинин А. В., Соболевский В. И. Месторождения полезных ископаемых и их разведка. 2-е изд. Москва : Недра, 1968. 302 с.
- Богущ И. А., Бурцев А. А., Шапошникова С. Д. Геохимия кобальта гидротермально-осадочных руд медно-колчеданных месторождений Северного Кавказа // Наука Юга России. 2018. Т. 14. № 1. С. 89–96. DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-89-96.
- Боришанская С. С., Виноградова Р. А., Крутов Г. А. Минералы никеля и кобальта (систематика, описание, диагностика). Москва : МГУ, 1981. 224 с.
- Ворошин С. В., Еремин Р. А., Тюкова Е. Э., Шахтыров В. Г. Новые материалы по структуре и минералогии Омчакского узла // Геохимия и минералогия рудных месторождений Северо-Востока СССР. Магадан : СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. С. 67–86.
- Гамянин Г. Н., Горячев Н. А. Кобальт-арсенидное оруденение Северо-Востока Азии: типы и генезис // Тектоника, рудные месторождения и глубинное строение земной коры : Материалы Всероссийской конференции с международным участием. IV чтения памяти С. Н. Иванова. Екатеринбург, 17–19 мая 2011. Екатеринбург, 2011. С. 45–48.
- Гамянин Г. Н., Лыхина Е. И. Ni-Co арсениды и сульфоарсениды золото-редкометалльных месторождений Восточной Якутии // Записки Всероссийского минералогического общества. 2000. Ч. 129. Вып. 5. С. 126–138.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. 2-е изд. Серия Магаданская, лист Р-56-XXXI. Объяснительная записка П. Н. Анорова Г. М. Юдиной, М. И. Зименко / Ред. И. Н. Котляр, В. Н. Смирнов, эксперт Т. Б. Русакова. 11 декабря 2001 г.
- Гриценко Ю. Д., Спиридонов Э. М. Сульфоарсениды и сульфоантимониды никеля, кобальта, железа и крутовит метаморфогенно-гидротермальных карбо-

натных жил норильского рудного поля // Новые данные о минералах. 2006. Вып. 41. С. 46–55.

Колова Е. Е., Малиновский М. А. Минералогия и условия формирования золотосодержащих кобальтовых руд месторождения Обход (Северо-Восток России) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2015. № 2. С. 15–27.

Крутов Г. А. Месторождения кобальта. Москва : Госгеолтехиздат, 1959. 232 с.

Крутов Г. А. Месторождения кобальта // Рудные месторождения СССР. Москва : Недра, 1974. Т. 2. С. 75–98.

Перельман А. И. Геохимия: учебник для геол. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Высшая школа, 1989. 528 с.

Перельман Ф. М., Зворыкин А. Я. Кобальт и никель. Москва : Наука, 1975. 215 с.

Савва Н. Е., Парфенов М. И. Со-Ni минерализация золото-сульфидно-вкрапленных руд месторождения Дегдекан // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2001. Т. 2. С. 78–81.

Спиридонов Э. М., Гриценко Ю. Д. Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. Москва : Научный мир, 2009. 214 с.

Спиридонов Э. М., Чвилёва Т. Н. О границе между герсдорфитом и крутовитом // Доклады АН. 1995. Т. 341. С. 785–787.

Умитбаев Р. Б. Охотско-Чаунская металлогеническая провинция (строение, рудоносность, аналоги). Москва : Наука, 1986. 286 с.

Hem S. R., Makovicky E. The system Fe-Co-Ni-As-S. II. Phase relations in the (Fe,Co,Ni)As_{1.5}S_{0.5} section at 650° and 500 °C // Canadian Mineralogist. 2004. Vol. 42. P. 63–86.

Klemm D. D. Synthesen und Analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS₂-CoS₂-NiS₂ // Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen. 1965. B. 103. H. 3. S. 205–255. DOI: 10.1127/njma/103/1965/205.

Kreißl S., Gerdes A., Walter B., Newmann U., Wenzel T., Markl G. Reconstruction of a >200 Ma multi-stage “five element” Bi-Co-Ni-Fe-As-S system in the Penninic Alps, Switzerland // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 95. P. 746–788. DOI: 10.15496/publikation-24256.

Orberger B., Pašava J., Gallien J. P., Daudin L., Pinti D. L. Biogenic and abiogenic hydrothermal sulfides: Controls of rare metal distribution in black shales (Yukon Territories, Canada) // Journal of Geochemical Exploration. 2003. Vol. 78. No. 1–2. P. 559–563. DOI: 10.1016/S0375-6742(03)00141-9.

Поступила в редакцию 29.08.2023.

Поступила после доработки 09.10.2023.

DIARSENIDES AND SULFOARSENIDES OF Fe, Co, Ni SPATIALLY RELATED TO THE LEFT-SEYMKAN GRANITE PLUTON (Magadan Oblast, Russia)

N. E. Savva

Northeast Interdisciplinary Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan, Russia

The Ni-Co mineralization in the Levo-Seimkan ore cluster has been studied. In xenoliths of gabbro-diorites from of the Levo-Seimkan granite massif, the disseminated sulfoarsenide and sulfoantimonide mineralization with predominant antimonial nickeline and with the gersdorfite-krutovite series minerals has been revealed, with a constant Sb admixture in gersdorfite (from 1.1 to 2.4 wt. %) and nickeline (Sb 3.2–12.2 wt. %) in association with pyrrhotite. In a new ore occurrence (Puglivy Creek, Arman River basin, 2 km from the mouth), in a stockwork of quartz-chlorite veins localized directly in the granites of the Levo-Seymkan massif, the Co-As-Bi-Te-Au mineralization has been established. Ore mineral nests and inclusions are represented by glaucodote (Ni under 3.28 wt. %), associated with native Bi, bismuthine, tellurovismuthite, hedleyite, and native Au. Ni-Co mineralization of disseminated ores from gabbro-diorite xenoliths from the Levo-Seymkan massif and from the stockwork localized in the massif granites (roof outshot in the Puglivy Creek), as well as from veins and veinlets in contact hornfelses (Puglivoye and Obkhod deposits). It has been found that mineral phases are not as characteristic for mineralization in granites and Ni hornfelses, and that the Co/Ni increases with distance from the Levo-Seimkan massif due to the lower migration ability of Ni relative to that of Co in the course of successive geochemical differentiation.

Keywords: Magadan Oblast, Levo-Seymkan massif, Co-Ni-As-Bi mineralization, Fe-Ni-Co sulfoarsenides and sulfoantimonides.

REFERENCES

- Bogachyova, E. N., Gorbunov, E. Z., Dorokhin, I. V., Druzhinin, A. V., Sobolevsky, V. I., 1968. Mineral Deposits and Their Exploration. Moscow, Nedra [In Russian].
- Bogush, I. A., Burtsev, A. A., Shaposhnikova, S. D., 2018. Geochemistry of Cobalt of Hydrothermal-Sedimentary Ores of Copper-Pyrite Deposits of the North Caucasus, *Science of the South of Russia*. 14 (1), 89–96. DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-89-96 [In Russian].
- Borishanskaya, S. S., Vinogradova, R. A., Krutov, G. A., 1981. Nickel and Cobalt Minerals: Systematics, Description, Diagnostics. Moscow, Moscow State University [In Russian].
- Gamyagin, G. N., Goryachev, N. A., 2011. Cobalt-Arsenide Mineralization in Northeast Asia: Types and Genesis, *Tectonics, Ore Deposits, and the Deep Structure of the Earth's Crust : Materials of All-Russia Conference with International Participation. 4th Readings in Memory of S. N. Ivanov. Ekaterinburg, May 17–19, 2011. Yekaterinburg*, 45–48 [In Russian].
- Gamyagin, G. N., Lykhina, E. I., 2000. Ni-Co Arsenides and Sulfoarsenides of Gold-Rare Metal Deposits in Eastern Yakutia, *Zapiski RMO*. 129, 5, 126–138 [In Russian].
- Gritsenko, Yu. D., Spiridonov, E. M., 2006. Sulfoarsenides and Sulfoantimonides of Nickel, Cobalt, Iron and Krutovite from Metamorphogenic Hydrothermal Carbonate Veins of the Norilsk Ore Field, *New Data on Minerals*. 41, 46–55.
- Hem, S. R., Makovicky, E., 2004. The System Fe–Co–Ni–As–S. II. Phase Relations in the (Fe,Co,Ni)As_{1.5}S_{0.5} Section at 650° and 500 °C, *Canadian Mineralogist*. 42, 63–86.
- Klemm, D. D., 1965. Synthesen und Analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS–CoAsS–NiAsS und FeS₂–CoS₂–NiS₂, *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*. 103, 3, 205–255. DOI: 10.1127/njma/103/1965/205 [In German].
- Kolova, E. E., Malinovskiy, M. A., 2015. Mineralogy and Conditions of Gold-Bearing Cobalt Ore Formation at the Obkhod Deposit (North-East of Russia), *Bulletin NESR FEB RAS*. 2, 15–27 [In Russian].
- Kreißl, S., Gerdes, A., Walter, B., Newmann, U., Wenzel, T., Markl, G., 2018. Reconstruction of a >200 Ma Multi-Stage “Five Element” Bi-Co-Ni-Fe-As-S System in the Penninic Alps, Switzerland, *Ore Geology Reviews*. 95, 746–788. DOI: 10.15496/publikation-24256.
- Krutov, G. A., 1959. Cobalt Deposits. Moscow, Gosgeoltekhizdat [In Russian].
- Krutov, G. A., 1974. Cobalt Deposits, *Ore Deposits in the USSR*. Moscow, Nedra, 2, 75–98 [In Russian].
- Orberger, B., Pašava, J., Gallien, J. P., Daudin, L., Pinti, D. L., 2003. Biogenic and Abiogenic Hydrothermal Sulfides: Controls of Rare Metal Distribution in Black Shales (Yukon Territories, Canada), *Journal of Geochemical Exploration*. 78 (1–2), 559–563. DOI: 10.1016/S0375-6742(03)00141-9.
- Perelman, A. I., 1989. Geochemistry : Textbook for Geological Specialities of Universities. Moscow, Vysshaya Shkola [In Russian].
- Perelman, F. M., Zvorykin, A. Ya., 1975. Cobalt and Nickel. Moscow, Nauka [In Russian].
- Savva, N. E., Parfyonov, M. I., 2001. Co-Ni Mineralization of Gold-Sulfide-Dispersed Ores of the Degdekan Deposit, *Problems of Geology and Metallogeny of North-east Asia at the Turn of the Millennia*. Magadan, NEISRI FEB RAS, 2, 78–81 [In Russian].
- Spiridonov, E. M., Chvilyova, T. N., 1995. On the Boundary between Gersdorffite and Krutovite, *Doklady Akademiyi Nayk*. 341, 785–787 [In Russian].
- Spiridonov, E. M., Gritsenko, Yu. D., 2009. Epigenetic Low-Grade Metamorphism and Co-Ni-Sb-As Mineralization in the Norilsk Ore Field. Moscow, Scientific World [In Russian].
- State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1 : 200 000 (2nd ed.). Magadan series, Sheet P-56-XXXI. Explanatory Note by P. N. Anorov, G. M. Yudina, M. I. Zimenko. Eds. I. N. Kotlyar, V. N. Smirnov, Reviewer T. B. Rusakova. December 11, 2001.
- Umitbaev, R. B., 1986. Okhotsk-Chaun Metallogenic Province: Structure, Ore Content, Analogs. Moscow, Nauka [In Russian].
- Voroshin, S. V., Yeryomin, R. A., Tyukova, E. E., Shakhtyrov, V. G., 1989. New Materials on the Structure and Mineralogy of the Omchak Node, *Geochemistry and Mineralogy of Ore Deposits in the USSR's North-East*. Magadan, NEISRI FEB AS USSR, 67–86 [In Russian].