УДК 550.84

А.А.САВИЧЕВ
Геолого-разведочный факультет,
аспирант кафедры минерализации, кристаллографии и петрографии

ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ Au-Sb-W-МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВЕРХНЕ-ЕНАШИМИНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ, СИБИРЬ)

Полистадийное Au-Sb-W-оруденение Верхне-Енашиминского рудного узла обнаруживается в месторождениях и рудопроявлениях эндоконтакта гранитоидов (Высокое-2), ближнего экзоконтакта (Оленье, Иннокентьевское) и дальнего экзоконтакта (Олимпиада). В составе рудной минерализации выделяется пять стадий (от ранних к поздним): кварц-вольфрамит-шеелит-сульфидная с кварц-вольфрамитовой и шеелит-сульфидной минеральными ассоциациями, золото-сульфидная с шеелит-пирротиновой и золото-арсенопиритовой ассоциациями, полиметаллическая со сфалерит-халькопирит-пирротиновой и ульманит-пиритовой ассоциациями, золото-сульфоантимонитовая с пирротин-бертьеритовой, золото-гудмундит-антимонитовой и ассоциацией самородных элементов; пострудная карбонатная. По арсенопиритовому геотермометру определены возможные температуры формирования арсенопирита разных генераций I-IV: 430±50, 335±60, 395±90 и менее 280 °С. Выявлена минералогическая зональность узла, заключающаяся в смене высокотемпературной минерализации ранних стадий на низкотемпературную поздних стадий по мере удаления от гранитоидного интрузива. Присутствие минералов кобальта, никеля и ртути в составе полиметаллической стадии на месторождении Олимпиада обусловливается его приуроченностью к узлу сочленения рудоконтролирующих разрывных нарушений с зоной глубинного регионального Татарского разлома.

The multistage Au-Sb-W ores of Verkhne-Enashiminsky ore area are placed in deposits and occurrences of granite endocontact (Vysokoe-2), proximal exocontact (Olenye, Innockentevskoe) and far exocontact (Olympiada). The ore mineralization has five stages (from early to late ones): quarz-wolframite-scheelite-sulfide with quarz-wolframite and scheelite-sulfide mineral assemblages; gold-sulfide with scheelite-pyrrotite and gold-arsenopyrite assemblages; polymetal with sphalerite-chalcopyrite-pyrrotite and ulmanite-pyrite assemblages; gold-sulfoantimonite with pyrrotite-berthierite, gold-gudmundite-stibnite and native element assemblages; post ore carbonate. Using an arsenopyrite geothermometer the possible temperature of different generations arsenopyrite formation is determined: 430±50, 335±60, 395±90, < 280 °C. The mineralogical zonality of ore area consisting in change high-temperature mineralization of early stages on low-temperature of late stages in process of distance from granite intrusive is revealed. The presence of cobalt, nickel and mercury minerals of polymetal stage on Olympiada deposit is caused by its position in the site of addition ore controlled faults with a deep regional Tatar shear zone.

В состав Верхне-Енашиминского рудного узла входит ряд месторождений и рудопроявлений золота, сурьмы и вольфрама. По особенностям их пространственной локализации (рис.1) выделяются объекты эндоконтакта гранитоидов (вольфрамовое проявление Высокое-2), ближнего экзоконтакта (месторождение золота и вольфрама Оленье, месторождение золота Тырадинское, рудопроявления золота Высокое и Иннокентьевское) и дальнего экзоконтакта (месторождение золота и сурьмы Олимпиада).

Особенностью геологической позиции золоторудных объектов является их приуроченность к горизонту углеродистых и карбонатных пород, подстилающих и перекрывающих кварц-слюдистые сланцы кординской свиты (рис.1). Важную роль в локализации оруденения играют разломы широтного и юго-западного – северо-восточного простирания [1].

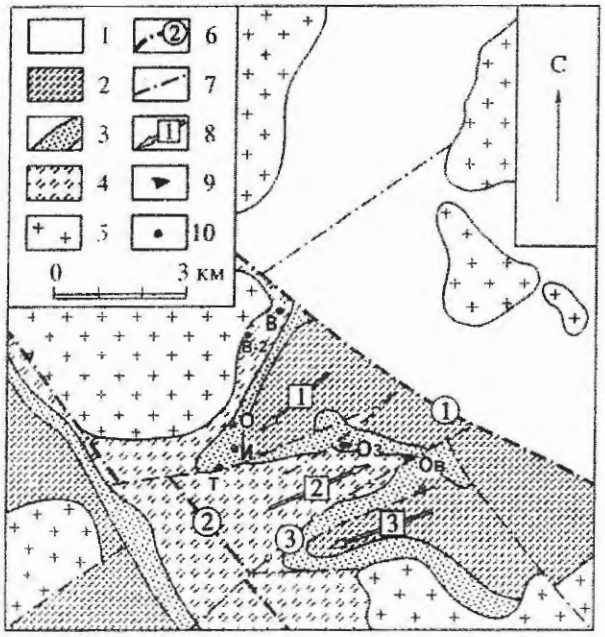


Рис.1. Схематическая геологическая карта Верхне-Енашиминского рудного узла

1 – кварц-слюдистые сланцы горбилокской свиты; 2 – верхняя пачка кварц-слюдистых сланцев кординской свиты; 3 – углеродсодержащие слюдисто-кварц-карбонатные сланцы, карбонатные породы (маркирующий горизонт); 4 – нижняя пачка кварц-слюдистых сланцев; 5 – граниты, гранодиориты татарско-аяхтинского комплекса; 6 – региональные глубинные разломы (1, 2 и 3 – Татарский, Тырадинский и Главный); 7 – рудоконтролирующие разрывные нарушения; 8 – оси складок и направление их погружения (1, 2 и 3 – Иннокентьевская синклиналь, Медвежинская антиклиналь и Чиримбинская синклиналь); 9 – участки месторождения Олимпиада (Оз – западный, Ов – восточный); 10 – рудопроявления (О – Оленье, И – Иннокентьевское, Т – Тырадинское, В – Высокое, В-2 – Высокое-2)

Методами оптической и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и локального микроанализа установлен минеральный состав руд месторождений Олимпиада, Оленье и рудопроявлений Иннокентьевское и Высокое-2 (табл.1).

В составе рудной минерализации узла выделяется пять стадий (табл.2). Основой для их выделения явились структурные и физико-химические критерии стадийности [2].

Минералы кварц-вольфрамит-шеелит-сульфидной стадии I локализованы в незолотоносных кварцевых жилах и прожилках в эндо- и экзоконтакте гранитоидов (Высокое-2, Оленье). Вольфрамит замещается шеелитом 1 в ассоциации с арсенопиритом 1 и пиритом 1. Сульфиды этой стадии сильно катаклазированы и перекристаллизованы, что свидетельствует о наложении на них более поздних тектонических процессов.

Таблица 1

Рудная минерализация месторождений и проявлений Верхне-Енашиминского рудного узла

Месторождение	Рудные минералы		
	Основные	Второстепенные	Примеси
Олимпиада	Пирротин, арсенопирит, бертьерит, антимонит	Пирит, шеелит	Самородное золото, халькопирит, галенит, сфалерит, ульманит, цумоит*, колорадоит*, маккинавит, пентландит, виллиамит*, джемсонит, гудмундит, самородная сурьма, киноварь, фаза $FeNiSbS_2$*, фаза Fe_2NiSbS_3*
Оленье	Пирротин, арсенопирит, шеелит	Пирит	Самородное золото, халькопирит, галенит, сфалерит, ульманит, жозеит А*, самородная сурьма, бертьерит, антимонит, гудмундит
Иннокентьевское	Арсенопирит, пирротин	Пирит	Самородное золото, самородная сурьма халькопирит, антимонит, кермезит, гудмундит, джемсонит
Высокое-2**	Вольфрамит	Шеелит	Арсенопирит, пирит

* Обнаружены на месторождении впервые.

** По результатам поисковых работ 1953 г. зафиксировано присутствие в рудах незначительных количеств пирротина, халькопирита, сфалерита, антимонита, киновари и единичных знаков самородного золота.

Таблица 2

Последовательность и условия формирования эндогенной рудной минерализации Верхне-Енашиминского рудного узла

Стадия	Минеральная ассоциация	Минералы			Условия формирования	
		рудные		характерные нерудные	Температура (100-500 °С)	Активность серы
		главные	редкие			
I. Кварц-вольфрамит-шеелит-сульфидная	Кварц-вольфрамитовая	Вольфрамит		Кварц		
	Шеелит-сульфидная	Шеелит 1	Арсенопирит 1, пирит 1	Кварц, турмалин		
II. Золотосульфидная	Шеелит-пирротиновая	Пирротин 1, шеелит 2	Халькопирит 1	Цоизит		
	Золото-арсенопиритовая	Арсенопирит 2	Пирит 2, золото 1			
III. Полиметаллическая	Сфалерит-халькопирит-пирротиновая	Пирротин 2, халькопирит 2, арсенопирит 3, сфалерит 1	Галенит, жозеит, цумоит, колорадоит	Кварц, хлорит, рутил		
	Ульманит-пиритовая	Пирит 3, ульманит	Маккинавит, пентландит, виллиамит, фазы $NiFeSbS_2$ и $NIFe_2SbS_3$	Кальцит		
IV. Золотосульфоантимонитовая	Пирротин-бертьеритовая	Пирротин 3, бертьерит	Джемсонит, сфалерит 2	Кальцит		
	Золото-гудмундит-антимонитовая	Антимонит 1, гудмундит	Пирит 4, арсенопирит 4, золото 2, кермезит	Кварц		
	Самородных элементов	Самородная сурьма	Золото 2			
V. Пострудная карбонатная	Карбонат-флюорит-пиритовая	Пирит 5	Антимонит 2, киноварь	Кальцит, флюорит, хлорит		

Рудная минерализация золото-сульфидной стадии II образует тонкую (1-200 мкм) вкрапленность в золотоносных цоизит-кварцевых, углеродистых слюдисто-кварцевых и слюдисто-кварц-карбонатных метасоматитах ближнего и дальнего экзоконтактов. Ранняя ассоциация (халькопирит 1 – шеелит 2 – пирротин 1) сменяется парагенезисом (золото 1 – пирит 2 – арсенопирит 2), при этом арсенопирит и пирит отчетливо корродируют пирротин. Выделения высокопробного самородного золота 1 размером 5-20 мкм изредка обнаруживается в срастаниях с арсенопиритом. Основная часть золота, по-видимому, присутствует в арсенопирите в дисперсном виде с размерами частиц не более нескольких нанометров [2].

Минерализация полиметаллической стадии III присутствует на месторождениях Олимпиада и Оленье, где локализована в кварцевых жилах и прожилках, секущих золотоносные метасоматиты с вкрапленной минерализацией стадии II. Характерной особенностью полиметаллического оруденения является разнообразие его минерального состава. В ранний парагенезис входят пирротин 2,

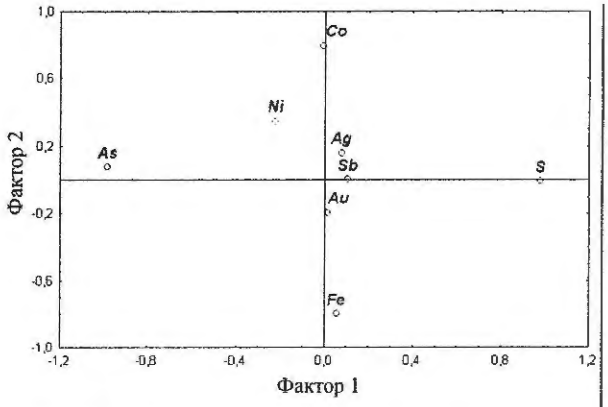


Рис.2. Диаграмма факторных нагрузок на состав арсенопиритов Верхне-Енашиминского рудного узла

арсенопирит 3, образующие крупные кристаллы размером до 1-2 см, а также халькопирит 2, галенит, сфалерит 1, цумоит BiTe, жозеит А (Bi_4TeS_2) и колорадоит HgTe. Пирротин 2 замещается пиритом 3 в ассоциации с ульманитом NiSbS, виллиамитом (Co, Ni)SbS, маккинавитом $Fe_{1+x}S$, пентландитом $(Ni,Fe)_9S_8$, а также фазами $NiFeSbS_2$ и $NIFe_2SbS_3$, ранее не описанными ни на одном месторождении мира.

Рудная минерализация золото-сульфоантимонитовой стадии IV имеет прожилково-вкрапленный характер, наложена на вкрапленную минерализацию стадии II и имеет широкое распространение в месторождениях дальнего экзоконтакта и незначительное на других объектах. В ранний парагенезис входят пирротин 3, бертьерит $FeSb_2S_4$, джемсонит $Pb_4FeSb_6S_{14}$ и сфалерит 2. Следующую ассоциацию составляют золото 2, гудмундит FeSbS, арсенопирит 4, пирит 4 и антимонит 1, замещающий бертьерит. Золото 2, содержащее до 6 % ртути и лишенное примеси серебра, характерного для раннего золота 1, отмечается и в наиболее позднем парагенезисе с самородной сурьмой.

Пирит 5, антимонит 2 и киноварь относятся к пострудной стадии и вместе с карбонатом, хлоритом и флюоритом слагают наиболее поздние незолотоносные прожилки, секущие тела с минерализацией ранних стадий месторождения Олимпиада.

Состав арсенопирита – минерала, наиболее тесно ассоциирующего с золотом и присутствующего в составе минерализации всех рудных стадий, определен микроренгеноспектральным анализом. Его результаты обработаны методом главных компонент факторного анализа. Структура главных факторов, описывающих характер изоморфизма в анионной (фактор 1) и катионной группах (фактор 2) минерала, представлена на рис.2.

Особенности состава арсенопирита разных генераций из различных объектов узла представлены на диаграмме значений факторов (рис.3).

Отношение As/S в исследованных арсенопиритах практически всегда меньше единицы и закономерно уменьшается в ряду генераций 1, 2, 4. Арсенопириты генераций 1 и 2 несколько отличаются только по отношению As/S. Состав арсенопирита генерации 3 весьма изменчив. В отличие от практически гомогенных арсенопиритов других стадий, кристаллы арсенопирита генерации 3 отчетливо зональны: их центральные части схожи по составу с арсенопиритом генерации 2, а краевые зоны значительно обогащены кобальтом, никелем и мышьяком, что, по-видимому, связано с кристаллизацией минерала на фоне повышения температуры растворов. Арсенопирит генерации 4 характеризуется значительным преобладанием серы над мышьяком, As/S уменьшается до 0,56, что не укладывается в интервал 0,74-1,35 для природных арсенопиритов [3-7].

Оценка температуры формирования арсенопирита произведена с использованием арсенопиритового геотермометра [7] в версии З.Шарпа, согласно которому содержание As в минерале зависит только от температуры и давления, если активность серы буферируется парой пирит-пирротин, что выполняется для изучаемых объектов [8]. Возможные температуры формирования арсенопирита генераций 1, 2, 3 и 4 соответственно 430±50, 335±60, 395±90 и 130±95 °С. Температура кристаллизации арсенопирита генерации 4 не может считаться достоверной, поскольку интерполяция в область ниже 300 °С сопряжена со значительными ошибками. Однозначно можно утверждать что она ниже 280 °С – температуры разложения гудмундита, ассоциирующего в

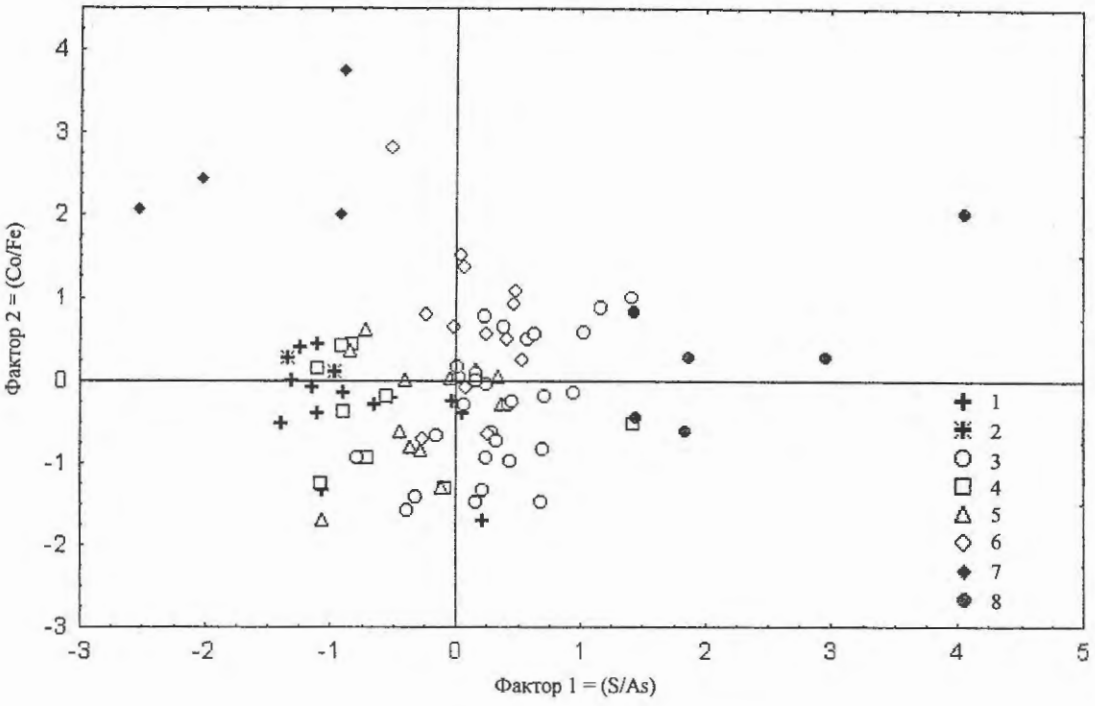


Рис.3. Диаграмма значения факторов

1 и 2 – генерация 1 (Высокое и Оленье соответственно); 3, 4 и 5 – генерация 2 (Олимпиада, Иннокентьевское и Оленье соответственно); 6 и 7 – генерация 3 (Оленье и Олимпиада); 8 – генерация 4 (Олимпиада)

месторождениях узла с арсенопиритом генерации 4 [6].

Температура образования золотоносного арсенопирита генерации 2 на месторождениях рудного узла варьирует в пределах 270-400 °С, причем наиболее высокие температуры характерны для арсенопирита объектов ближнего экзоконтакта, а нижняя часть этого интервала (310±60 °С) относится к минералу месторождения Олимпиада. А.Д.Генкин на этом месторождении методом определения температур гомогенизации газово-жидких включений в кварце, ассоциирующем с арсенопиритом, оценил температуру его формирования: более 400 °С [3]. По моему мнению, такие параметры завышены, поскольку показывают температуру кристаллизации кварца метасоматитов, на которые наложена арсенопиритовая минерализация на Олимпиаде. Это подтверждается тем фактом, что содержание мышьяка в золотоносном арсенопирите, синтезированном Х.Ву при температурах 400 и 500 °С, лежит в пределах 33-35 %, в то время как на месторождении Олимпиада этот интервал составляет 29-31 % [9].

Главной временнóй закономерностью изменения параметров рудообразования Верхне-Енашиминского рудного узла является понижение температур кристаллизации минералов от ранних стадий к поздним. Подобную тенденцию проявляет и величина активности серы в минералообразующих растворах [7], которая, однако, в пределах каждой стадии повышается от ранних ассоциаций к поздним, что выражается в дисульфидизации моносульфида железа (замещение пирротина пиритом).

Пространственная изменчивость оруденения определяет минералогическую зональность узла, заключающуяся в смене высокотемпературной минерализации ранних стадий на низкотемпературную поздних стадий по мере удаления от гранитоидного интрузива. Такая закономерность находит свое отражение и в особенностях состава минералов, как показано выше для арсенопирита.

Присутствие минералов кобальта, никеля и ртути, по всей видимости имеющих глубинный источник, в составе полиметаллической стадии на месторождении Олимпиада может быть связано с его приуроченностью к узлу сочленения рудоконтролирующих разрывных нарушений с зоной регионального Татарского разлома.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Генкин А.Д.* Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский кряж, Сибирь) / А.Д.Генкин, В.А.Лопатин, Р.А.Савельев, Ю.Г.Сафонов, Н.Б.Сергеев, А.Л.Керзин, Х.Амшутц, З.Б.Афанасьева, Ф.Вагнер, Г.Ф.Иванова // Геология рудных месторождений.1994. Т.3. № 2.

2. *Кигай И.Н.* О пульсационной теории и критериях стадийности гидротермального минералообразования // Зональность гидротермальных рудных месторождений. М.: Наука, 1974. Т.2.

3. *Генкин А.Д.* Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга / А.Д.Генкин, Ф.Е.Вагнер, Т.Л.Крылова, А.И.Цепин // Геология рудных месторождений. 2002. Т.44. № 1.

4. *Кларк Л.* Фазовые отношения в системе Fe-As-S // Проблемы эндогенных месторождений. М.: Мир, 1966. Вып.3.

5. *Тюкова Е.Э.* Арсенопирит: зависимость параметров кристаллической структуры от состава / Е.Э.Тюкова, Т.И.Махоркина // Записки ВМО. 1990. Вып.1.

6. *Clark L.X.* Heating experiments on gudmundite // Miner. Mag. 1966. V. 35, № 236.

7. *Kretschmar U., Scott S.D.* Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their applications / U.Kretschmar, S.D.Scott // Canad. Miner. 1976. V.14.

8. *Sharp Z.D.* A Re-examination of the arsenopyrite geothermometr: pressure considerations and applications to the natural assemblages / Z.D.Sharp, E.J.Essene, W.C.Kelly // Canad. Miner. 1985. V.23.

9. *Wu X.* Condition of formation of gold-bearing arsenopyrite: a comparsion of syntetic crystals with samples from Le Chatelet gold deposit, Creuse, France / X.Wu, F.Delbove, J.C.Touray // Mineral. Deposita. 1990. 25 [Suppl].

Научный руководитель д.г.-м.н. проф. *В.В.Гавриленко*