

МИНЕРАЛОГИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КУХМО (ФИНЛЯНДИЯ)

© 2014 г. К. А. Новоселов*, Е. В. Белогуб*, О. С. Ермолина-Кутсие*,
А. Б. Михайлов**, В. А. Котляров*

*Институт минералогии УрО РАН
456317, г. Миасс Челябинской обл.
E-mail: const@ilmeny.ac.ru

**Mineral Exploration Network (Finland)
28 Fidlas Ave., Cardiff, UK CF14 0NY

Поступила в редакцию 04.04.2013 г.

На золоторудных проявлениях зеленокаменного пояса Кухмо (Восточная Финляндия) установлена устойчивая связь самородного золота и висмута (Йосиярви, Пиилола, Хеттеила), отражающих низкотемпературные условия образования в восстановительной обстановке. На рудопроявлениях Пиилола и Йосиярви золото-висмутовая минерализация ассоциирует с арсенопиритом, кристаллизация которого происходила при температуре 450–550°C. Золото совместно с висмутом кристаллизовалось в ретроградную фазу метаморфизма при температурах, соответствующих зеленосланцевой фации. Самородные золото и висмут, образующие включения в арсенопирите, можно интерпретировать как остаточный расплав. Преобладающее значение пирротина и магнетита (Хеттеила) в рудах, наряду с присутствием самородного висмута и мальдонита, свидетельствует о восстановительных условиях рудообразования и низкой фугитивности серы и теллура. Сделана попытка объяснения минералогических черт оруденения с позиций теории **Liquid Bismuth Collector Model (LBCM)**. В качестве источника золота предполагаются рассеянные сульфиды вулканогенно-осадочного происхождения.

Ключевые слова: Финляндия, зеленокаменный пояс Кухмо, золоторудные месторождения.

ВВЕДЕНИЕ

Металлогенический потенциал зеленокаменных поясов, помимо месторождений колчеданных и никелевых руд, определяется золотым оруденением. Золоторудные месторождения в зеленокаменных поясах могут иметь реликтовую палеоостроводужную природу (эпитермальные, золотоносные колчеданные), но в большинстве случаев формируются при орогенезе и внедрении коллизионных гранитов. Условия образования определяют преимущественный структурный контроль оруденения и его приуроченность к породам, метаморфизованным в условиях верхов зеленосланцевой – низов амфиболитовой фации [5]. Наиболее известными примерами, характеризующими данный тип оруденения, являются многочисленные месторождения Канадского щита (провинции Абитиби, Сьюперитор), Западной Австралии (провинция Мурчисон) и др.

Ассоциация золота и минералов висмута, в целом, типична для орогенных золоторудных месторождений в зеленокаменных поясах. Важным вопросом является источник золота в этих месторождениях. Ранее доминировала гипотеза о привнесении золота с гидротермальными флюидами, связанными с гранитоидным магматизмом. В насто-

ящее время в качестве одного из источников рассматриваются вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы с рассеянным в сульфидах золотом, возможность чего обосновывается существованием реликтов колчеданных и эпитермальных месторождений. Оценка условий переноса золота и формирования золотоносных парагенезисов важна для определения источника золота месторождений зеленокаменных поясов.

Золотоносность архейских зеленокаменных поясов Фенноскандинавского щита, по сравнению с канадскими и австралийскими, изучена слабо. В последней четверти 20 в., после обнаружения золототеллуридного месторождения Кутемаярви, стартовала обширная программа изучения золотоносности территории Финляндии, которая привела к открытию ряда рудопроявлений и месторождений. Однако, минералогия руд изучена в недостаточной мере, что признается и финскими специалистами [7].

Целью настоящей работы является минералогическая характеристика и оценка условий формирования рудопроявлений золота зеленокаменного пояса Кухмо. В ее основе лежат материалы, полученные при ревизии керн скважин известных проявлений по заказу компании Mineral exploration network (Finland). Рудная минерализация изучена

в полированных шлифах и в тяжелых концентратах проб-протолок, отобранных точечным способом из продуктивных интервалов керна скважин. Оптико-минералогические работы проводились с использованием микроскопов Neophot 2, Axio-lab (Zeiss). Анализ химического состава минералов проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа РЭММА-202М с EDAX, аналитик В.А. Котляров (Институт минералогии УрО РАН). При характеристике химических особенностей руд использованы данные анализов рядовых проб, выполненные геологической службой Финляндии.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КУХМО

Финская часть Фенноскандинавского щита подразделяется на три домена, которые имеют общую историю начиная примерно с 1.8 млрд. лет: Карельский, представляющий собой архейское ядро, и палеопротерозойские мобильные пояса – Свекофенский и Лапландский.

Архейские породы могут быть подразделены на тоналит-грандиорит-гранитный (ТТГ) комплекс и несколько главных супракрустальных поясов: Ойярви, Кухмо-Суомуссалми и Иломантси. Вулканогенно-осадочный комплекс Кухмо-Суомуссалми, объединяющий зеленокаменные пояса Кухмо, Суомуссалми и Типасъярви, возможно был сформирован во внутриплитной океанической обстановке [9]. Его центральная часть (зеленокаменный пояс Кухмо) имеет симметричное строение при субмеридиональном простирании. Выделяется несколько этапов деформаций и метаморфизма, последний из которых имеет протерозойский возраст.

Пояс Кухмо сложен метаморфизованными вулканитами, стратиграфическая последовательность которых незначительно различается в различных частях пояса. Обрамлением служат породы гранито-гнейсового комплекса, в которых сохранились реликты метаморфизованных Fe-толеитовых базальтов, преобразованных в полосчатые мигматизированные амфиболиты [11, 12]. Именно эти реликты являются старейшей стратиграфической единицей в районе. Их возраст оценивается как 3100–2900 млн. лет.

Основание зеленокаменного комплекса представлено вулканогенными породами (2810–2790 млн. лет), принадлежащими к бимодальной серии. Эти породы перекрываются толеитовыми базальтами, обычно представленными пиллоу-лавами с прослоями железистых кварцитов типа Алгома. Стратиграфически выше во всех частях пояса залегают коматитовые лавы. Выше наблюдается базальтовый комплекс, вмещающий тонкие прослои коматитов. Местами основные и ультраосновные породы перекрываются вулканогенными конгломератами с обломками известково-щелочных пород от кислого до основ-

ного состава. Завершают разрез пелитовые осадки и кварциты с участками конгломератов [11, 12].

Породы инъецированы архейскими гранитоидами. Наиболее ранние (2740–2720 млн. лет) – дайки тонкозернистых тоналит-гранодиоритов. Более поздние дайки гранитов имеют возраст 2710–2690 млн. лет и 2680 млн. лет. Раннепротерозойские граниты рапакиви (2450–2400 млн. лет) формируют батолиты. Архейский комплекс пересекают многочисленные дайки основного состава протерозойского возраста: бонинитов (2450 млн. лет) толеитов и Fe-толеитов (2200 млн. лет).

ЗОЛОТОРУДНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

В поясе Кухмо известно 15 рудопроявлений золота, в том числе рассмотренные нами проявления Аитторанта, Йосиярви, Пиилола, Муйесуо, Хеттеила (рис. 1). Их краткая характеристика опирается на данные Финской геологической службы (ГТК) [6] и собственные наблюдения авторов.

Рудопроявление *Йосиярви* вмещается моноклинально-залегающими апотуффиловыми кристаллическими сланцами биотитового и мусковит-биотитового состава, содержащими прослойку вкрапленность пирротина, редко прослойки пирротиновых руд с цементной текстурой. Максимальные содержания золота в пределах трехметрового интервала составляют 1.440–3.820 г/т [15].

Для золотоносных зон характерны повышенные содержания мышьяка. Средние содержания мышьяка в пачке рудовмещающих сланцев составляют 293 г/т при стандартном отклонении 185. Средние содержания теллура для той же выборки составляют 0.11 г/т при стандартном отклонении 0.05. Коэффициент корреляции золота с мышьяком (+0.50) и теллуrom (+0.10) не значим.

На рудопроявлении *Пиилола* золотрудная минерализация приурочена к контактовой зоне между пачкой слюдястых сланцев и метаграувакк с гранито-гнейсами. Западная часть участка имеет спокойное в целом моноклиналиное строение с восточным падением. В центральной части залегание пород нарушено многочисленными жилами гранитов, зонами гранитизации и милонитизации. В северной части участка (Ликасуо) распространены скарны.

Наиболее высокие содержания золота в известных пересечениях составляют (г/т): 3 (проба длиной 0.5 м), 7.5, 6.6, 4.3 и 3.8 в керновых пробах длиной 1 м [13]. Продуктивные на золото зоны приурочены к слюдястым сланцам с невыдержанными элементами залегания, заключенным между крупными жилами гранитов. Повышенные содержания золота ассоциируют с сульфидной минерализацией, но иногда участки с повышенными концентрациями сульфидов стерильны в отношении золота. В минерализованных породах золото коррелирует с мышьяком и незначительно – с теллуrom. Сред-

нее содержание теллура по рудопроявлению оценивается как 0.0726 г/т (из выборки исключены пробы с содержанием более 0.3 и менее 0.025 г/т), содержания более 0.1144 г/т отнесены к аномальным. Максимальные концентрации теллура составляют 0.284 г/т. Теллуридная минерализация в рудах не доказана, но не исключено присутствие теллуридов висмута в ассоциации с золотом.

Участок рудопроявления *Муйесуо* характеризуется переслаиванием метаморфизованных пород основного и ультраосновного состава. Метаультрабазиты представлены тремолитовыми, тальк-карбонатными, хлорит-тремолитовыми сланцами, metabазиты – актинолитовыми, актинолит-биотитовыми, актинолит-хлоритовыми сланцами. Породы имеют варьирующую мощность и часто не увязываются друг с другом в соседних скважинах. Залегание в целом моноклиальное, близкое к вертикальному с переменным падением. В западной части участка распространены жилы гранитоидов, в центральной и восточной частях – жилы гранитоидов маломощные, распространены кварцевые и кварц-карбонатные жилы. Повышенные содержания золота (до 9 г/т в пересечении 1 м) приурочены к кварцевым жилам и зонам окварцевания в metabазальтах.

Сульфидная минерализация (пирротин, пирит, халькопирит) приурочена к metabазитам в зонах окварцевания, развития карбонатных жил и на контактах с гранитоидами. Повышенные концентрации золота наблюдаются в незначительно окварцованных актинолит-биотитовых апобазитовых сланцах. Следует заметить, что зоны с повышенными содержаниями золота макроскопически не отличаются от безрудных.

Рудопроявление *Хеттеила* локализовано в сульфидизированных гранат-амфиболовых породах и полосчатых амфиболитах в толще метаосадочных пород и метавулканитов толеитового и комаититового состава. Содержания золота достигают 1.6 г/т и приурочены к пачке полосчатых амфиболитов. Вмещающие породы представлены биотит-актинолитовыми, гранат-биотит-актинолитовыми, гранат-биотитовыми сланцами и амфиболитами, которые инъецированы жилами гранитоидов. В толще кристаллических сланцев отмечаются невыдержанные тела амфиболитов с пятнистой текстурой. Падение пород восточное под углом 30–40°. Маркирующее значение имеет горизонт гранат-актинолитовых пород мощностью первые метры. Среди биотит-актинолитовых сланцев встречаются участки, обогащенные гранатом, которые можно трактовать как гранатые бластомилониты. Тектонический контроль этих зон подчеркнут развитием очковых, линзовидных текстур. Гранат-актинолитовые породы обогащены сульфидами железа, которые образуют невыдержанные линзовидные зонки, а также ассоциируют с послойными и секущими кварцевыми прожилками. Продук-

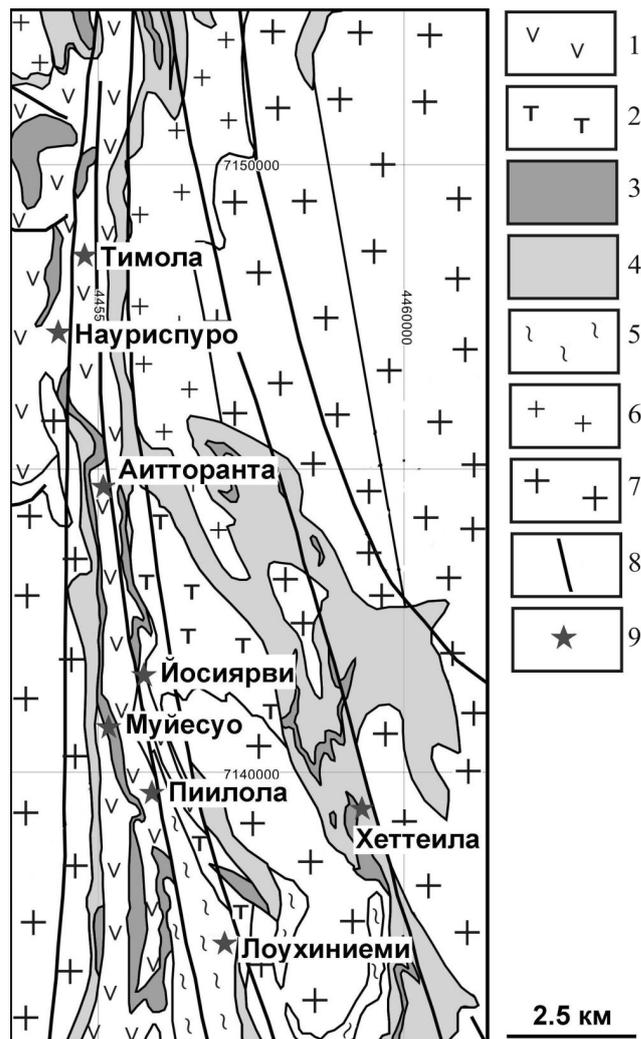


Рис. 1. Позиция рудопроявлений золота в структуре зеленокаменного пояса Кухмо (по материалам Геологической службы Финляндии GTK с упрощениями).

1 – полосчатые амфиболиты, 2 – кислые метавулканиды и вулканокластические породы, 3 – метакомаититы, 4 – магнезиальные толеитовые metabазальты, 5 – слюдистые сланцы, 6 – лейкограниты и гранодиориты, 7 – тоналиты и гранодиориты нерасчлененные, 8 – тектонические зоны, 9 – рудопроявления золота.

тивные на золото зоны ассоциируют с гранат-актинолитовыми породами, обогащенными сульфидами и смежными с ними кристаллическими сланцами.

РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

Рудная минерализация изученных участков характеризуется преимущественным развитием вкрапленных текстур. Зачастую вкрапленность тонкозернистая, пылевидная. Когломератобрекчии с сульфидным (преимущественно пирротинным) цементом встречены в зонах дробления на рудопроявлениях Пиилола и Йосиярви. Мощность тел с це-

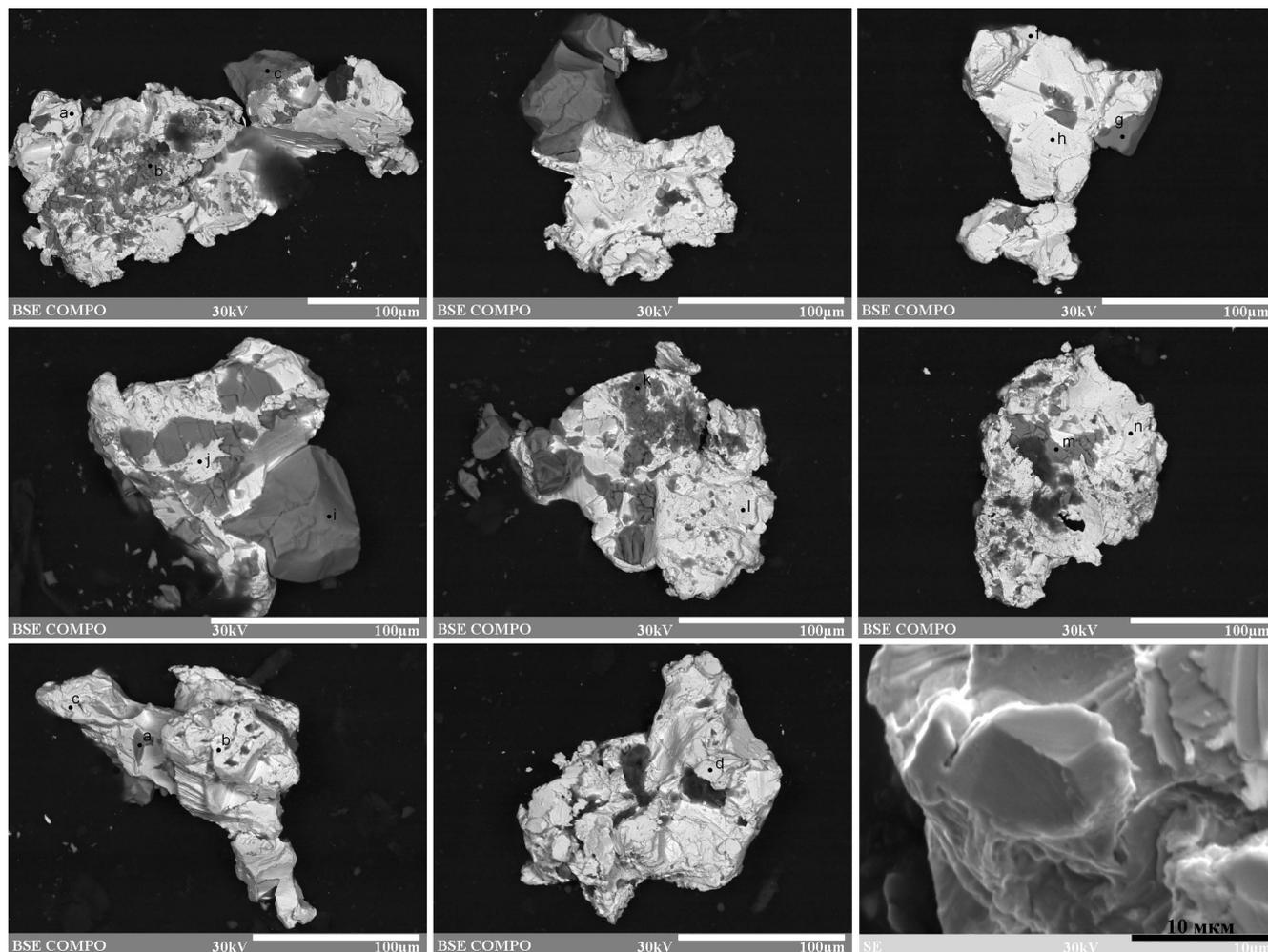


Рис. 2. Форма частиц и скульптура поверхности золота из тяжелых концентратов проб-протолок. СЭМ РЭММА-202М. Аналитик В. А. Котляров (ИМин УрО РАН).

ментными рудами обычно не превышает первых десятков сантиметров. На всех изученных проявлениях сульфидная минерализация встречается также в составе кварцевых и кварц-полевошпатовых жил.

Состав рудообразующих минералов довольно однообразен, среди главных минералов типичны пирротин, арсенопирит и пирит. Соотношения между ними варьируют. Обычно в том или ином количестве присутствуют халькопирит, пентландит, иногда сфалерит и шеелит. Для рудопроявления Хеттеила характерно существенное развитие магнетита. Золото концентрируется в самородной форме. На рудопроявлениях Пиилола, Хеттеила, Йосиярви в ассоциации с золотом установлена висмутовая минерализация.

Самородное золото, выявленное в составе тяжелых концентратов, образует угловатые частицы изометричной и удлиненной формы. В некоторых индивидах проявлены элементы огранки (рис. 2). В полированных шлифах самородное золото наблюдалось как в виде свободных вкраплений в си-

ликатной матрице, так и в виде включений в арсенопирите и сростков с ним. Реже наблюдались включения золота в халькопирите и пирротине. На рудопроявлении Муйесуо самородное золото выявлено в жильном кварце, содержащем халькопирит и пирротин. Отмечены сростания золота с самородным висмутом. Размер выделений золота варьирует от 0.09 до 0.30 мм.

По составу преобладает высокопробное золото (табл. 1). Пробность увеличивается в ряду Йосиярви – Муйесуо – Пиилола и Хеттеила (рис. 3). Наиболее высокие содержания серебра установлены в золоте рудопроявления Йосиярви. На рудопроявлении Хеттеила наряду с высокопробным золотом встречен электрум с содержанием серебра 43.85 мас. %. Содержания меди в золоте рудопроявлений Пиилола и Хеттеила обычно находятся на уровне 0.01 к. ф. Зависимость состава золота от минеральной ассоциации не выявлена.

Арсенопирит из продуктивных золотосодержащих ассоциаций проанализирован для рудопрояв-

Таблица 1. Состав золота из рудопроявлений зеленокаменного пояса Кухмо (мас. %)

Участок	Проба	Au	Ag	Cu	Сумма	Формула
Хеттеила	R416/44.3 (18233a)	98.38	1.27	0.27	99.92	$Au_{0.97}Ag_{0.02}Cu_{0.01}$
	R416/44.3 (18233d)	96.3	3.22	0.44	99.96	$Au_{0.93}Ag_{0.06}Cu_{0.01}$
	R416/44.3 (18233e)	96.48	3.26	0.24	99.98	$Au_{0.93}Ag_{0.06}Cu_{0.01}$
	R416/44.3 (18233c)	55.79	43.85	0.25	99.89	$Ag_{0.59}Au_{0.41}Cu_{0.01}$
Пиилола	R425/33.1 (18232d)	99.57	0.00	0.26	99.83	$Au_{0.99}Ag_{0.01}$
	R425/33.1 (18232e)	96.02	3.57	0.43	100.02	$Au_{0.92}Ag_{0.06}Cu_{0.01}$
	R425/33.1 (18232g)	95.77	3.88	0.38	100.03	$Au_{0.92}Ag_{0.06}Cu_{0.01}$
	R425/33.1 (18232h)	97.4	2.09	0.45	99.94	$Au_{0.95}Ag_{0.04}Cu_{0.01}$
	R425/33.1 (18232i)	96.9	2.69	0.33	99.92	$Au_{0.94}Ag_{0.05}Cu_{0.01}$
	R425/33.1 (18231a)	96.78	2.64	0.39	99.8	$Au_{0.94}Ag_{0.05}Cu_{0.01}$
	R425/33.1 (18231b)	96.34	3.15	0.39	99.88	$Au_{0.93}Ag_{0.06}Cu_{0.01}$
	R425/33.1 (18231c)	96.86	2.68	0.38	99.92	$Au_{0.94}Ag_{0.05}Cu_{0.01}$
	R462/44.1(19112a)	96.86	2.81	н.о.	99.67	$Au_{0.95}Ag_{0.05}$
	R462/44.1(19112f)	97.39	2.52	н.о.	99.91	$Au_{0.95}Ag_{0.05}$
Йосиярви	R330/31.5н.о.33 (1959b)	83.22	16.49	0.22	99.93	$Au_{0.73}Ag_{0.26}Cu_{0.01}$
	R330/31.5н.о.33 (1959c)	74.59	25.18	0.18	99.95	$Au_{0.62}Ag_{0.38}$
	R330/31.5н.о.33 (1959a)	86.42	13.14	0.32	99.87	$Au_{0.78}Ag_{0.22}$
	R330/31.5н.о.33 (1958a)	84.57	15.21	0.14	99.92	$Au_{0.75}Ag_{0.25}$
	R330/31.5н.о.33 (1958b)	85.08	14.58	0.181	99.84	$Au_{0.76}Ag_{0.24}$
Муйесуо	R342/44.3(19114d)	94.47	5.56	н.о.	100.04	$Au_{0.90}Ag_{0.10}$
	R342/44.3(19114e)	93.87	5.96	н.о.	99.82	$Au_{0.90}Ag_{0.10}$
	R342/44.3(19114a)	90.28	9.6	н.о.	99.88	$Au_{0.84}Ag_{0.16}$
	R342/44.3(19114b)	94.35	5.30	н.о.	99.66	$Au_{0.91}Ag_{0.09}$
	R342/44.3(19114c)	94.27	5.78	н.о.	100.05	$Au_{0.90}Ag_{0.10}$

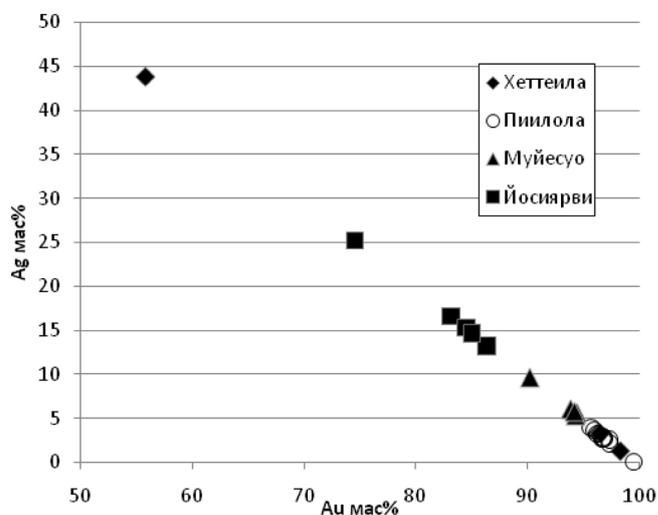
Примечание: СЭМ РЭММА-202М, аналитик В.А.Котляров (Институт минералогии УрО РАН); номер пробы включает в себя номер точки анализа (в скобках).

лений Пиилола и Йосиярви. Для состава арсенипирита характерны вариации соотношения мышьяка и серы от 0.88 до 1.27 (табл. 2, рис. 4). На рудопроявлении Йосиярви арсенипирит содержит примеси кобальта и никеля. Зональность распределения этих элементов не выявлена. Под электронным микроскопом можно наблюдать, что обогащенные никелем и кобальтом участки приурочены к центральной части выделений арсенипирита и не имеют кристаллографических очертаний.

В ассоциации с золотом установлены самородный висмут, мальдонит и теллурид висмута. Эти минералы встречаются в виде очень мелких зерен, размер которых часто не позволяет получить удовлетворительные анализы.

Самородный висмут встречается в виде включений в арсенипирите, магнетите. Выделения имеют сложную, часто ксеноморфную форму, размер достигает 50 мкм (рис. 5). Минерал часто образует сростки с самородным золотом. В составе присутствует примесь сурьмы. Присутствие в анализах железа, мышьяка и серы, возможно, обусловлено влиянием матрицы (арсенипирита) (табл. 3).

Совместно с висмутом установлен *мальдонит*, который также встречается в виде угловатых включений размером до 10 мкм в арсенипирите. В химическом составе мальдонита присутствуют примеси серебра и меди (табл. 2).

**Рис. 3.** Вариации состава золота в рудопроявлениях зеленокаменного пояса Кухмо.

На рудопроявлении Хеттеила в единственном очень тонком выделении (менее 5 мкм) в магнетите был встречен теллурид висмута. Размеры выделения не позволяют получить количественный анализ минерала, энергодисперсионный спектр, полученный для точки g содержит линии теллура и висмута (рис. 6).

Таблица 2. Химический состав арсенопирита (мас. %)

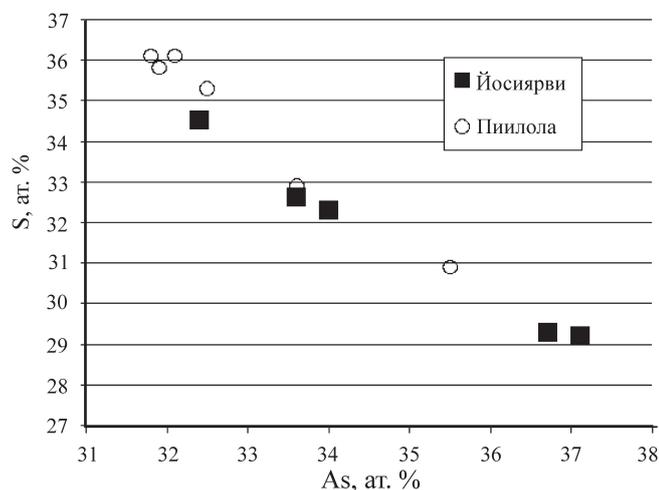
Участок	Проба	Fe	Co	Ni	As	S	Сумма	Формула
Йосиярви	R330/31.н.о.31.5(1959d)	34.11	0.41	0.14	44.87	20.4	99.93	$(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.01})_{0.96}\text{As}_{0.94}\text{S}_{1.00}$
	R330/31.5н.о.33(1958с)	29.73	3	0.98	49.4	16.67	99.78	$(\text{Fe}_{1.02}\text{Co}_{0.10}\text{Ni}_{0.03})_{1.15}\text{As}_{1.27}\text{S}_{1.00}$
	R330/31.5н.о.33(1958d)	32.37	1.87	0.24	46.27	18.93	99.68	$(\text{Fe}_{0.98}\text{Co}_{0.05}\text{Ni}_{0.01})_{1.04}\text{As}_{1.05}\text{S}_{1.00}$
	R330/31.5н.о.33(1958е)	32.75	1.9	0.21	45.94	19.14	99.95	$(\text{Fe}_{0.98}\text{Co}_{0.05}\text{Ni}_{0.01})_{1.04}\text{As}_{1.03}\text{S}_{1.00}$
	R330/31.5н.о.33(1958f)	29.58	3.27	1.13	49.26	16.84	100.08	$(\text{Fe}_{1.01}\text{Co}_{0.11}\text{Ni}_{0.04})_{1.16}\text{As}_{1.25}\text{S}_{1.00}$
Пиилола	R425/33.1(18232с)	33.81	н.о.	н.о.	47.89	17.77	99.48	$\text{Fe}_{1.09}\text{As}_{1.15}\text{S}_{1.00}$
	R425/33.1(18231f)	34.34	н.о.	н.о.	46.19	19.39	99.93	$\text{Fe}_{1.02}\text{As}_{1.02}\text{S}_{1.00}$
	R462/44.1(19112b)	33.52	0.06	н.о.	44.47	21.43	99.48	$\text{Fe}_{0.90}\text{As}_{0.89}\text{S}_{1.00}$
	R462/44.1(19112с)	33.48	н.о.	н.о.	45.43	21.08	99.99	$\text{Fe}_{0.91}\text{As}_{0.92}\text{S}_{1.00}$
	R462/44.1(19112d)	33.53	н.о.	н.о.	44.61	21.74	99.89	$\text{Fe}_{0.89}\text{As}_{0.88}\text{S}_{1.00}$
	R462/44.1(19112е)	33.08	0.12	н.о.	45.09	21.69	99.98	$\text{Fe}_{0.88}\text{As}_{0.89}\text{S}_{1.00}$

Примечание: СЭМ РЭММА-202М, аналитик В.А.Котляров (Институт минералогии УрО РАН); номер пробы включает в себя номер точки анализа (в скобках). Формулы рассчитаны для S = 1.

Таблица 3. Химический состав самородного висмута и мальдонита (мас.%)

№ п.п.	№ образца (спектра)	S	Bi	Fe	As	Sb	Au	Ag	Cu	Сумма
1	R425/33.1(18231d)	0.09	94.58	1.43	3.5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.6
2	R425/33.1(18232a)	н.о.	91.65	2.08	4.42	1.8	н.о.	н.о.	н.о.	99.95
3	R425/33.1(18232a)	н.о.	92.96	0	4.49	1.97	н.о.	н.о.	н.о.	99.42
4	R425/33.1(18232j)	0.05	92.89	1.99	4.38	0.6	н.о.	н.о.	н.о.	99.91
5	R425/33.1(18232f)	н.о.	99.9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.9
6	R425/33.1(18232b)	н.о.	31.94	2.26	н.о.	н.о.	61.41	0.69	0.17	99.87
7	R425/33.1(18231e)	1.18	30.68	2.75	н.о.	н.о.	60.57	0.48	0.21	99.99
8	R416/44.3(18233b)	0.76	30.75	2.81	н.о.	н.о.	64.67	0.8	0.25	100.04
9	R416/44.3(18233f)	н.о.	94.29	5.53	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.82

Примечание: СЭМ РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров (Институт минералогии УрО РАН); буква в номере спектра соответствует буквам на рис. 5.

**Рис. 4.** Отношение As–S (ат. %) в арсенопирите из рудопроявлений Йосиярви и Пиилола.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Рудопроявления золота в поясе Кухмо различаются по геологическому строению, составу вмещающих пород и минеральному составу продуктивных зон.

Вмещающие породы представлены метавулканитами основного и ультраосновного состава (Муйесуо), полосчатыми амфиболитами (Хеттеила), метатUFFитами (Йосиярви), слюдястыми сланцами (Пиилола). Уровень метаморфизма вмещающих пород переходный от фации зеленых сланцев к амфиболитовой, на что указывает повсеместное распространение актинолита и редкость гранат-амфиболовых парагенезисов, приуроченных исключительно к локальным зонам бластеза.

Для продуктивных на золото минерализованных зон характерно повсеместное присутствие пирротина, который образует послынную вкрапленность, цемент в брекчиевидных рудах и гнезда в кварцевых прожилках. Реже встречается пирит. Арсенопирит образует видимые скопления редко, но повышенное содержание мышьяка в обогащенных золотом интервалах указывает на его более широкое распространение. Халькопирит и сфалерит встречаются редко. Самородное золото наблюдалось в рудах рудопроявлений Пиилола, Йосиярви, Муйесуо и Хеттеила. Чаще всего золото ассоциирует с арсенопиритом. В ассоциации с золотом установлены также минералы висмута. На рудопроявлении Хеттеила продуктивная ассоциация включает в себя пирротин и магнетит,

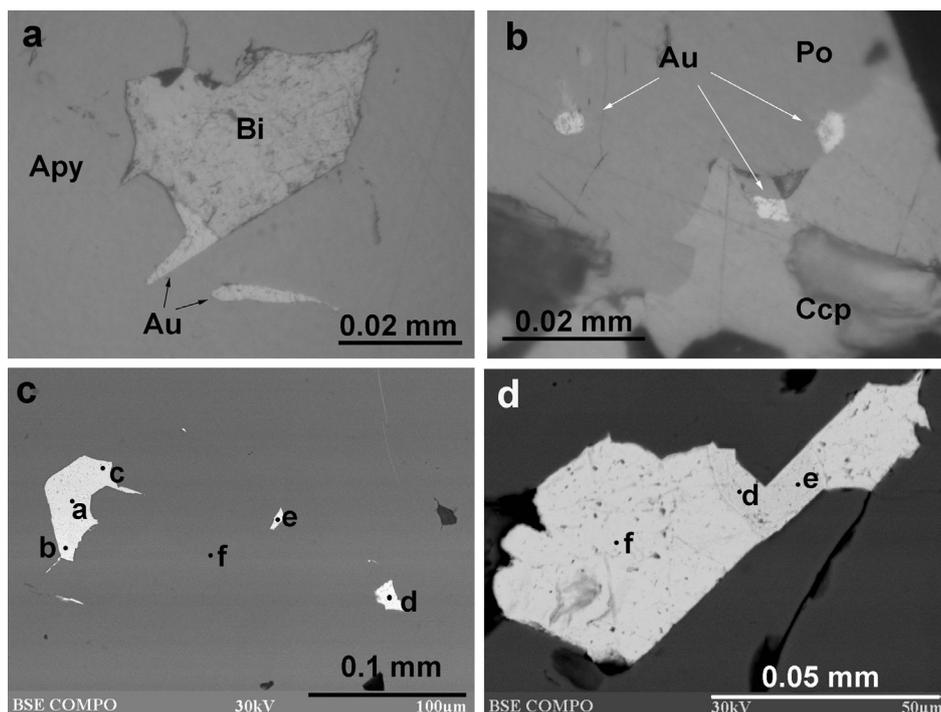


Рис. 5. Золото-висмутовая минерализация на рудопроявлениях зеленокаменного пояса Кухмо (буквы соответствуют номерам спектра в табл. 2).

а – включение самородного золота и висмута в арсенопирите (Apy), рудопроявление Йосиярви, масляная иммерсия, отраженный свет; б – включения золота на границе халькопирита (Ccp) и пирротина (Po) и в пирротине в кварцевом прожилке, рудопроявление Муйесуо, масляная иммерсия, отраженный свет; в – висмут (d), золото (a, b, e), мальдонит (e) в арсенопирите (f), рудопроявление Пиилола, BSE изображение, анализ 18231; г – сросток самородного золота (d, e) и висмута (f) в арсенопирите, BSE изображение, анализ 18232b.

золото-висмутовая минерализация представлена включениями в магнетите.

Информативность химического состава арсенопирита для оценки температур рудообразования рассматривалась в работах Л. Кларка [3], У. Кречмара и С. Скотта [8] и др. В соответствии с выводами из экспериментального исследования У. Кречмара и С. Скотта [8], соотношение серы и мышьяка в арсенопирите, ассоциирующем с разными минералами, зависит от температуры (рис. 7).

Арсенопирит в изученных рудопроявлениях, как правило, ассоциирует с пирротинном, реже – с пиритом. На рудопроявлении Йосиярви в составе арсенопирита в существенных количествах присутствуют кобальт и никель (до 4.4 вес. % Co + Ni), что ограничивает использование арсенопиритового геотермометра, поскольку геотермометрия на основе арсенопирита допускается при суммарном содержании кобальта и никеля не более 1 мас. % [8]. Имеющиеся данные по рудопроявлению Пиилола, где содержания мышьяка в арсенопирите не менее 34 ат. %, позволяют говорить о температурах его кристаллизации 450–550°C, что соответствует амфиболитовой или эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма.

Эти данные согласуются с результатами изучения флюидных включений в кварце из золотонос-

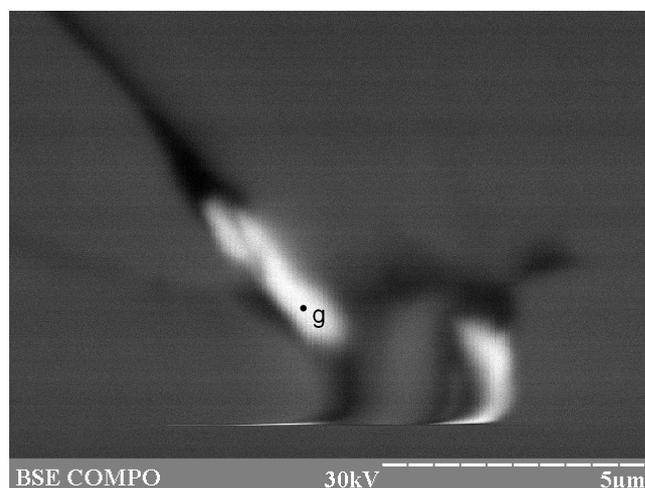


Рис. 6. Теллурид висмута из руд рудопроявления Хеттеила в магнетите.

СЭМ РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров (ИМин УрО РАН).

ных кварц-турмалин-арсенопиритовых жил рудопроявления Аитторанта в поясе Кухмо [14]. Приведенная оценка температур охватывает диапазон

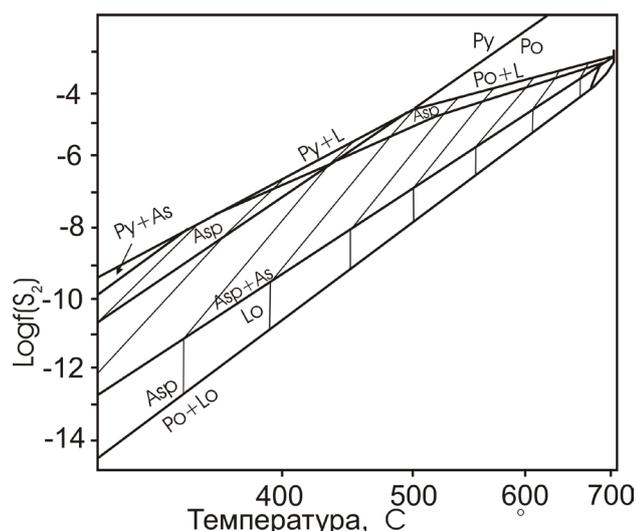


Рис. 7. Вариации состава арсенипирита как функция температуры и минеральной ассоциации. Все ассоциации содержат газовую фазу [8 с упрощением].

Asp – арсенипирит, lo – леллингит, po – пирротин, py – пирит, As – мышьяк, Ж – жидкая фаза.

450–500°C при давлении 2.5–3.5 кбар. Состав включений $H_2O-CO_2 \pm CH_4 \pm$ галит; соленость флюида умеренная и высокая (до 37 вес. % $NaCl_{эв.}$). На основе полученных данных авторами сделан вывод, что жильная система рудопоявления Аитторанта формировалась в высокотемпературных условиях на глубоких уровнях земной коры. Пространственная близость рудопоявления Аитторанта и сходство минеральных парагенезисов вмещающих пород с рассмотренными рудопоявлениями позволяет экстраполировать на них данные об эволюции флюида.

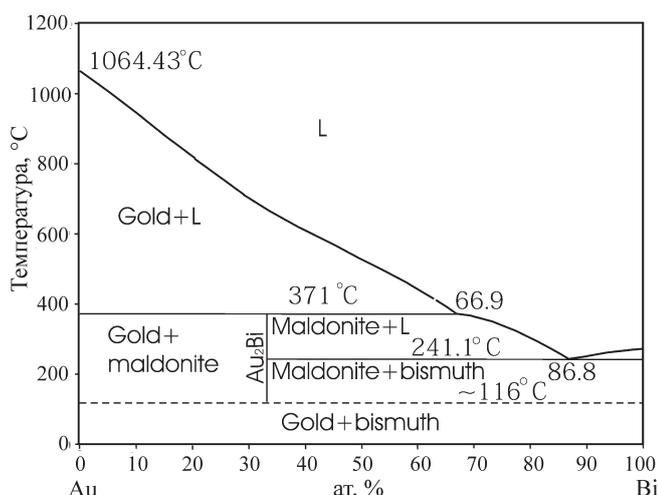


Рис. 8. Фазовая диаграмма системы Au-Bi [10].

Минералы **Ві** являются признанными петрогенетическими индикаторами в золоторудных месторождениях. Температура плавления висмута составляет 271°C. В гидротермальном флюиде, имеющий более высокую температуру при достижении пересыщения, висмут обособливается в виде жидкой фазы. В соответствии с теорией, известной как Liquid Bismuth Collector Model (LBCM) [4] висмутовый расплав может экстрагировать растворенное золото из гидротермального флюида в результате того, что емкость расплава висмута по отношению к гидротермальному значительно выше емкости раствора [10]. Последующая миграция золота и его отложение происходит совместно с висмутом. При температуре флюида 450–500°C в висмуте может быть растворено до 40 вес. % золота (рис. 8).

Таким образом, присутствие висмута в гидротермальном растворе приводит к концентрированию золота. При этом основные элементы, входящие в состав сульфидов и арсенидов остаются в растворенном виде. Соответственно, формирование золото-висмутовой минеральной ассоциации может происходить с пространственным и временным отрывом от основной массы сульфидов и не соответствовать ей по температуре (висмутовые расплавы кристаллизуются при более низких температурах).

Кристаллизация золото-висмутовой ассоциации начинается при температуре 371°C с выпадения фазы состава Au_2Bi , соответствующей мальдониту [10]. Устойчивость мальдонита определяется диапазоном температур 371–116°C. При охлаждении ниже 116°C происходит эвтектический распад Au_2Bi на Au и Bi. Стабильность самородного висмута и мальдонита контролируется восстановительными обстановками, перекрывающими поля устойчивости пирротина и магнетита в координатах fS_2 и fO_2 [2]. Почти полное отсутствие в рудах теллуридов висмута может свидетельствовать о низких значениях fTe_2 и служить подтверждением восстановительных условий рудообразования.

С другой стороны, при метаморфизме возможно анатектическое плавление ряда легкоплавких компонентов руд, включая сульфосоли, теллуриды, а также висмут [16]. Э. Томкинс с соавторами [16], рассматривая применимость теории сульфидного анатексиса к орогенным месторождениям золота, отмечает, что начало плавления сульфидов здесь возможно при относительно высоких температурах. Арсенипирит-пиритовая ассоциация может плавиться в условиях низов амфиболитовой фации метаморфизма с образованием As-S расплава и пирротина, но только при высоких значениях fS_2 . При низких значениях fS_2 анатексис сульфидов может не происходить даже в условиях гранулитовой фации. Ремобилизация золота при более низких температурах может начинаться

при плавлении самородного висмута, находящегося с ним в контакте, однако, роль этого механизма для переноса золота в зеленокаменных поясах, по-видимому, локальна, ввиду редкости ассоциаций золота и висмута или легкоплавких висмут-содержащих сульфосолей в первично вулканогенных ассоциациях, где преобладает самородное золото и золото, рассеянное в пирите.

Следует отметить, что относительная роль эффекта ЛВСМ и сульфидного анатексиса для переноса золота активно дискутируется и в последних публикациях сторонники обеих теорий соглашаются с возможностью сосуществования обоих механизмов. Ремобилизация золота из первичных вулканогенно-осадочных сульфидных ассоциаций и его совместный перенос и отложение с висмутом, по-видимому, при соответствующих температурах возможны и при региональном (динамо-) и при контактовом метаморфизме. Примером последнего может служить Тарньерское медноколчеданное месторождение на Северном Урале, на котором ассоциация золота, самородного висмута и теллуридов висмута, сформированная при температурах 400–430°C, связана с перераспределением вещества колчеданных руд при внедрении гранитоидной интрузии [1].

Таким образом, на золоторудных проявлениях зеленокаменного пояса Кухмо установлена устойчивая связь самородного золота и висмута (Йосиярви, Пиилола, Хеттеила), отражающая низкотемпературные условия образования в восстановительной обстановке. На рудопоявлениях Пиилола и Йосиярви золото-висмутовая минерализация ассоциирует с арсенопиритом, кристаллизация которого происходила при температуре 450–550°C. Золото совместно с висмутом кристаллизовалось в ретроградную фазу метаморфизма при температурах, соответствующих зеленосланцевой фации. Самородные золото и висмут, образующие включения в арсенопирите, можно интерпретировать как остаточный расплав. Преобладающее значение пирротина и магнетита (Хеттеила) в рудах, наряду с присутствием самородного висмута и мальдонита, свидетельствует о восстановительных условиях рудообразования и низкой фугитивности серы и теллура. В качестве источника золота предполагаются рассеянные сульфиды вулканогенно-осадочного происхождения.

Авторы признательны руководству компании Mineral exploration network (Finland), за содействие при проведении полевых и лабораторных работ.

Работы проводились при поддержке Президиума Уральского отделения РАН (проект 11-5-НП-564, рук. О.С. Ермолина).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозуб Е.В., Молошаг В.П., Новоселов К.А., Котляров В.А. Самородный висмут, цумоит и свинцовистая разновидность цумоита из Тарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал) // Записки РМО. 2010. № 6. С. 108–119.
2. Ciobanu C., Cook N. Tellurides, selenides (and Bi-sulphosalts) in gold deposits. 11th IAGOD Symp-Geocongress, CD vol., Geol Surv Namibia. 2002.
3. Clark L. The Fe-As-S system: phase relations and applications // Econ. Geol. 1960. V. 55. P. 1345–1381.
4. Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R. The liquid bismuth collector model: an alternative gold deposition mechanism. AGC Abstr. 2000. V. 59. P. 135
5. Dube B., Gosselin P. Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits // A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Min. Depos. Canada. Spec. Publ. 2007. № 5. P. 49–73.
6. FINGOLD – публичная база данных месторождений золота Финляндии. <http://en.gtk.fi/information-services/palvelukuvaukset/fingold.html>.
7. Kojonen K. Au-Ag telluride-selenide deposits in Finland // Au-Ag-Te-Se deposits (Proceedings of the 2006 Field Workshop). 2006. P. 85–92.
8. Kretschmar U., Scott S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application // Canad. Mineral. 1976. V. 14. P. 364–386.
9. Lahtinen R., Holttä P., Kontinen A., Niiranen T., Niironen M., Saalman K., Sorjonen-Ward P. Tectonic and metallogenic evolution of the Fennoscandian shield: key questions within emphasis on Finland // Geol Surv. Finland Spec. Pap. 2011. V. 49. P. 23–33.
10. Okamoto K., Masaalski T.B. Au-Bi. Binary alloy phase diagrams // V. I. ASM Intl. 1983. P. 238–240.
11. Papunen H., Halkoaho T., Liimatainen J., Tulenheimo T. Komatiite geology of the Siivikkovaara and Kellojarvi areas of the Kuhmo greenstone belt. Turku: Turku University, 1998. 51 p.
12. Papunen H., Halkoaho T., Luukkonen E. Archaean evolution of the Tipasjarvi-Kuhmo-Suomussalmi greenstone complex, Finland // Geological Survey of Finland, Bulletin 403. Espoo: GTK, 2009. 68 p.
13. Pietikainen K., Hartikainen A., Niskanen M. Tutkimustyytelostus Kuhmon kaupungin pohjoisosassa sijaitsevista valtauksesta Piilolalla (Kaiv. RN:o 7659/1). 2006. 19 p.
14. Poutiainen M., Partamies S. Fluid inclusion characteristics of auriferous quartz veins in Archean and Paleoproterozoic greenstone belts of eastern and southern Finland // A group of papers devoted to the metallogeny of gold in the Fennoscandian Shield. Econ. Geol. 2003. V. 98, № 7. P. 1355–1369.
15. Tenhola M., Niskanen M. Tutkimustyytelostus Kuhmon kaupungissa valtausalueilla Aitto 1 (Kaivosrekisteri No 5032/1), Mujesuo 1 (Kaivosrekisteri No 5412/1), Jousijarvi 1 (Kaivosrekisteri No 5333/1) sekä Harmakangas 1 (Kaivosrekisteri No 6108/1) suoritetuista kulta- ja sinkkimalmmit. 2001. 15 p.
16. Tomkins A., Pattison D., Frost R. On the initiation of metamorphic sulfide anatexis // J. Petrol. 2007. Vol. 48, № 3. P. 511–535.

Рецензент В.П. Молошаг

Mineralogy of gold occurrences from the Kuhmo greenstone belt (Finland)

K. Novoselov*, **E. Belogub***, **O. Ermolina-Coetzee***,
A. Mikhailov**, **V.A. Kotlyarov***

**Institute of Mineralogy Urals Branch of RAS*

***Mineral Exploration Network (Finland)*

There is a strong association of gold with bismuth in the gold occurrences (Piilola, Jousijärvi, Hetteilä) of the Kuhmo greenstone belt (East Finland). It reflects relatively low-temperature conditions in reduced environments. Textural relations between ore minerals suggest that arsenopyrite was formed earlier than the gold and bismuth minerals. Its forming temperature was estimated as 450–550°C. Crystallisation of gold-bismuth association took place in regressive metamorphism phase under greenschist facies. Native gold and bismuth trapped in arsenopyrite may be interpreted as melt inclusion. Mineralogical features associated with the gold occurrences can be explained using the Liquid Bismuth Collector Model. Predominance of pyrrhotite and magnetite (Hetteila) in the ores, as long as native bismuth and maldonite presence, testify about reduced conditions and low values of f_{S_2} and f_{Te} . Supposed gold source is dispersed sulphides from wall volcanogenic rocks.

Key words: *Finland, greenstone belt Kuhmo, gold occurrences.*