

Сульфидное минералобразование на Бутугычагском оловорудном месторождении (Северо-Восток России)

Тюкова Е.Э.^{1,2}, Ворошин С.В.¹, Абрамова В.Д.², Савва Н.Е.³

¹ Научный геоинформационный центр РАН, Москва, evgtyuk@mail.ru

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, winterrain@rambler.ru

³ Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт РАН, Магадан, savva@neisri.ru

Аннотация. В работе рассмотрены сульфидные ассоциации, в том числе с самородным золотом, оловорудного месторождения Бутугычаг и близрасположенного рудопоявления Ачча. Широкий спектр минеральных ассоциаций, связанных с различными постмагматическими процессами (пегматитовыми жилами, грейзенизацией, альбитизацией, хлоритизацией, эпидотизацией) указывает на полиэтапное формирование сульфидных ассоциаций. О резкой смене условий минералообразования свидетельствует наличие двух типов парагенезисов арсенопирита, контролирующих геохимическую среду, существенный катаклиз более ранних ассоциаций и смена структурного плана более поздних жильных образований. Золото, содержащееся в ранней леллингитовой ассоциации, перераспределяется и укрупняется при воздействии растворов более поздних гидротермальных этапов. Для постмагматических растворов характерен хлоридный тип с концентрацией 5–40 % (NaCl) и широкий температурный интервал от 500° до 150°С.

Ключевые слова: оловоносные гранитоиды, золото-висмутовая минерализация, парагенезисы арсенопирита.

Sulfide mineralization at the Butugychag tin ore deposit (North-East of Russia)

Tyukova E.E.^{1,2}, Voroshin S.V.¹, Abramova V.D.², Savva N.E.³

¹ Geoinformatic Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow, evgtyuk@mail.ru

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, winterrain@rambler.ru

³ N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, savva@neisri.ru

Abstract. The paper considers sulfide associations of the tin mineralization (Butugychag deposit and neighbor Achcha occurrence), including those associated with native gold. Different mineral parageneses associated with a number of postmagmatic processes (pegmatoid veins, greisenization, albitization, chloritization, epidotization) suggests a multistage formation of sulfide associations. A sharp change in the conditions of mineral formation is evidenced by the presence of two types of arsenopyrite parageneses that control the geochemical environment, a significant cataclasis of earlier associations and a change in the structural plan of later vein formations. Gold contained in the early lellingite association is redistributed and coarsened when exposed to solutions of later hydrothermal stages. In general, postmagmatic solutions are characterized by a chloride type with a concentration of 5–40 % (NaCl) and a temperature range of 500–150°С.

Keywords: tin-bearing granitoids, gold-bismuth mineralization, arsenopyrite paragenesis.

Введение

Наиболее широко распространенные в Верхне-Колымском регионе золоторудные месторождения по минералого-геохимическим данным разделены на два типа: золото-кварцевые и золото-редкометалльные (Шило и др., 1969). Г.Н. Гамянин (Гамянин, 1991, Гамянин и др., 2003; Vikent'eva et al, 2018) относит их к арсенопиритовому и висмутовому типам единой золото-кварцевой формации. Одни исследователи рассматривают золото-кварцевые и золото-редкометалльные месторождения как образовавшиеся в результате единого постмагматического процесса, а различия в составе объясняют зональностью оруденения, другие рассматривают как производные совершенно разных

событий, третьи пытаются доказать комбинированный генезис оруденения, обусловленный как метаморфическими, так и постмагматическими процессами (Гончаров, 1983; Горячев, 1998).

Оловянные месторождения и проявления также широко распространены в регионе. Среди них выделяются касситерит-кварцевые, касситерит-силикатно-сульфидные, и олово-полиметаллические (Флеров, 1976). Первые два типа обычно пространственно ассоциируют с полнокристаллическими порфиroidными гранитоидными интрузиями, а третий – с субвулканическими интрузиями кислого и среднего составов.

Золото-редкометалльные, оловянные, а также молибденовые и серебро-полиметаллические месторождения и проявления приурочены к гранитным интрузиям небольшого размера или к ороговикованным породам вокруг них. Одно из оловянных месторождений рассмотрено ниже.

Геологические особенности Бутугычагского месторождения

Бутугычагское оловянное месторождение локализовано в северном эндоконтакте Западно-Бутугычагского гранитоидного интрузива (рис. 1). Магматические породы представлены крупно-, средне- и мелкозернистыми порфиroidными гранитами. Повсеместно развиты крутопадающие дайкообразные тела гранит-аплитов, аплитов и пегматитов. В структурном отношении Бутугычагское оловянное месторождение представляет собой серию линейных штокверков северо-восточного простирания (45–55°).

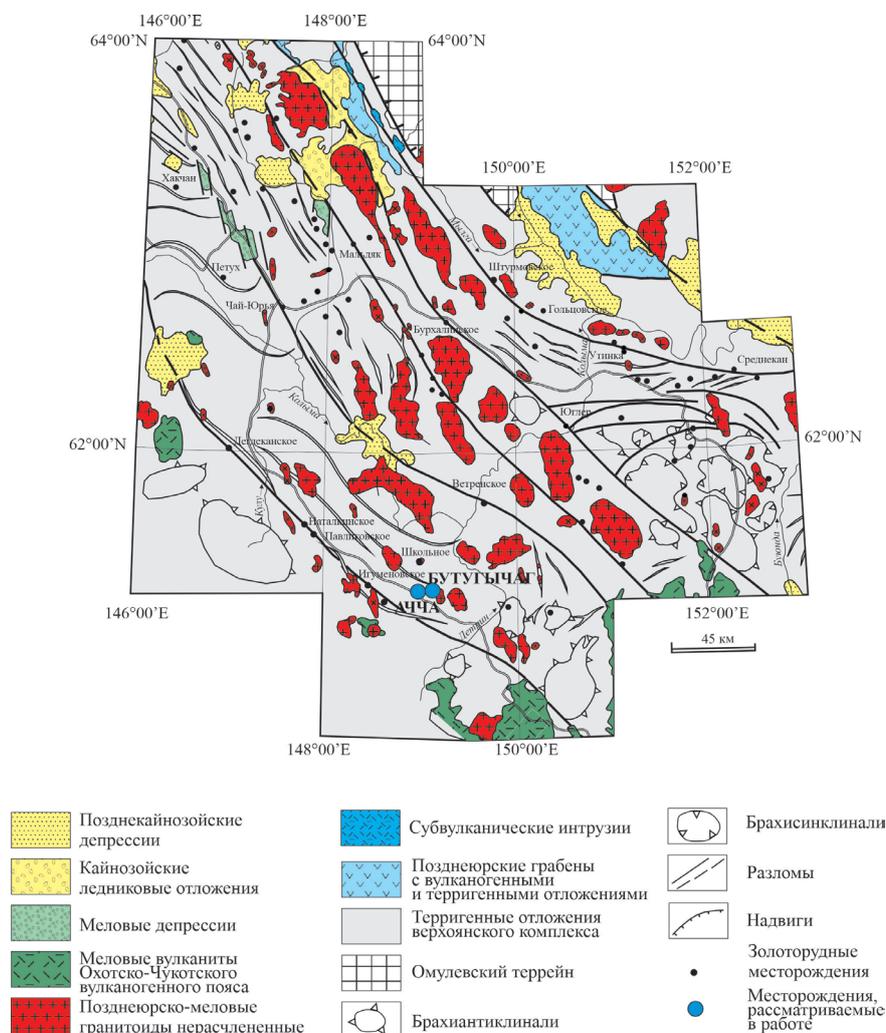


Рис. 1. Схема локализации изученных объектов в Верхне-Колымском регионе (структурная основа – по неопубликованным материалам В.Г. Шахтырова).

Fig. 1. Localization scheme of the studied objects in the Verkhne-Kolyma region (structural basis as per unpublished materials by V.G. Shakhthyrov).

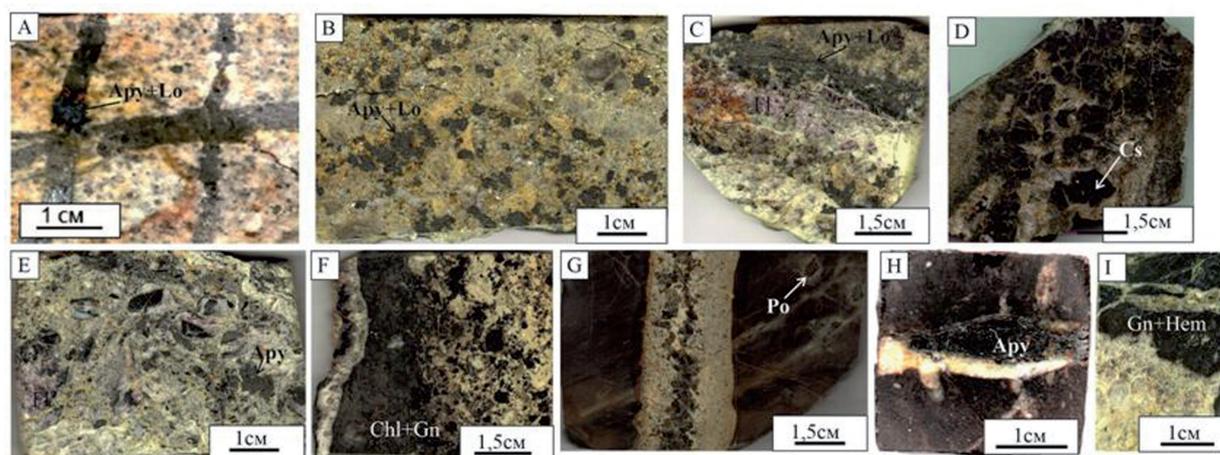


Рис. 2. Строение руд Бутугычагского месторождения и рудопроявления Ачча. А – сетчатое сульфидно-кварцевое прожилкование в гранитоидах (Аpy+Lo – ассоциация), обр. 2566/В-86; В – рассеянная сульфидная вкрапленность в эпидотизированном гранитоиде (Аpy+Lo – ассоциация), обр. 36/Т-88; С – линейная зона интенсивно катаклазированного сульфидного агрегата (Аpy+Lo – ассоциация), которая сменяется марказит-флюоритовой зоной, обр. 28/Т-88; D – жила с катаклазированным касситеритом, сцементированным хлорит-кварцевым агрегатом с полисульфидной вкрапленностью, обр. 2/Т-88; E – полистадийная брекчия с флюоритом, полисульфидами и самородным золотом, обр. 27/Т-88; F – кварц-хлоритовая жила с полисульфидной вкрапленностью, обр. 23/Т-88; G – жильный аплит с кварцевой осевой зоной пересекает сульфидизированную ороговикованную терригенную породу, обр. 505/Ш-86; H – сульфидно-кварцевый прожилок в ороговикованной породе, обр. 2268/В-86; I – полисульфидно-кварцевая жила с зоной, пропитанной иглами гематита и с зональным кристаллическим кварцем в осевой части, обр. 43/Т-88.

Fig. 2. The structure of the ores of the Butugychag deposit and the ore occurrence of the Achcha. A – reticulated sulfide-quartz veining in granitoids (Apy+Lo – association), 2566/V-86; B – scattered sulfide inclusions in epidotized granitoid (Apy+Lo – association), 36/T-88; C – linear zone of intensely cataclastic sulfide aggregate (Apy+Lo – association), which is replaced by a marcasite-fluorite zone, 28/T-88; D – vein with cataclastic cassiterite cemented by chlorite-quartz aggregate with polysulfide inclusions, 2/T-88; E – polystage breccia with fluorite, polysulfides and native gold, 27/T-88; F – quartz-chlorite vein with polysulfide inclusions 23/T-88; G – vein aplite with quartz axial zone intersects sulfidized keratinized terrigenous rock, 505/Sh-86; H – sulfide-quartz veins in the keratinized rock, 2268/V-86; I – polysulfide-quartz vein with a zone impregnated with hematite needles and with a zonal crystalline quartz in the axial part, 43/T-88.

Шток Ачча, расположенный к западу от Бутугычагского массива, относится к малым интрузиям и предполагается связанным с Бутугычагским массивом общностью очага. Гидротермальное оруденение представлено сложным сетчатым штокверком. Пространственная сближенность месторождения Бутугычаг и рудопроявления Ачча и черты сходства их геологической позиции дают основание для совместного рассмотрения процесса минералообразования. Обобщенная схема последовательности постмагматических процессов (с учетом отложения сульфидных парагенезисов) может быть представлена в следующем виде (табл. 1):

Характерна неравномерность распределения минеральных ассоциаций по площади плутона и, вероятно, пространственная зональность их проявления. Так, пегматоиды характерны для северной и центральной части Западно-Бутугычагского массива, альбитизация – для центральной части, а грейзенизированные породы соответствуют более глубоким срезам массива как центральной, так и его контактовых частей. Процесс грейзенизации, с которым связано появление значительного количества сульфидов (с подчиненным развитием касситерита и вольфрамит), наложен на альбитизированные породы. Сульфидная минерализация в штоке Ачча, по-видимому, сопряжена по времени с этим процессом на Бутугычаге и представляет собой сульфидно-кварцевые штокверки (рис. 2).

Касситерит-полевошпат-кварцевые жилы и прожилки формируют основные рудные тела собственно-оловорудного месторождения в северной части Западно-Бутугычагского массива. Пространственно они, как правило, разобщены с грейзенизированными породами и с зонами проявления более поздних низкотемпературных метасоматитов.

Таблица 1. Последовательность минералообразования на месторождении Бутугычаг.
Table 1. Sequence of mineral formation at the Butugychag deposit.

№ этапа	Этап минерализации	Тип метасоматических изменений	Главный парагенезис	Минералы ассоциаций этапа
I	Золото-редкометалльный	Альбитизация, грейзенизация	Арсенопирит-леллингитовый	Молибденит→арсенопирит+леллингит → Те-Vi –минералы+самородное золото→ халькопирит, сфалерит, пирротин (в роговиках)
II	Касситерит-кварцевый	Пегматоиды, полевошпат-кварцевые жилы	Касситерит-кварцевый	Касситерит, вольфрамит, шеелит, флюорит
III	Сульфидно-настурановый	Хлоритизация, эпидотизация	Арсенопирит-пиритовый	Арсенопирит+пирит+марказит→самородное золото→ галенит+сфалерит (халькопирит, пирротин, станнин)→флюорит, халцедон, карбонат, гематит, минералы урана

Хлоритизация и эпидотизация (метасоматиты и хлорит-кварцевые жилы) широко проявлены на флангах и в центральной части массива. С образованиями этого типа связано незначительное количество касситерита (и вольфрамит), но они повсеместно содержат сульфиды цветных металлов и жилы халцедоновидного кварца с флюоритом и гематитом. В этот период, видимо формируется и основная масса урановой минерализации.

Методика и методы исследования

Был изучен состав сульфидных минеральных ассоциаций и отдельных минералов с акцентом на парагенезисы арсенопирита. Содержание основных компонентов определялось с помощью РСМА (СВКНИИ ДВО РАН). Изучение микропримесей в сульфидах выполнено методом профильной лазерной абляции LA-ICP-MS в ИГЕМ РАН (прибор ThermoXSeries, лазер – NewWave 213, аналитик Абрамова В.Д.). Диаметр луча лазера 40–60 мкм, частота 10 Гц, энергия на поверхности образца 7–8 Дж/см², чувствительность для большинства элементов составляла 0.02–0.05 ppm.

Главные сульфидные ассоциации

Наиболее ранняя *молибденит-кварцевая* ассоциация, которая распространена широко в гранитоидах в виде прожилков с нерезкими контактами и дымчатым кварцем, аналогичным по внешнему облику кварцу гранитоидов. Эти образования пересекаются касситерит-полевошпат-кварцевыми прожилками и отмечается наложение на них леллингит-арсенопиритовой ассоциации.

Леллингит-арсенопиритовая ассоциация локализована в грейзенах или сульфидно-кварцевых прожилках, образующих штокверки. Количество сульфидной составляющей изменяется в пределах 10–30 %, размеры сульфидных гнезд могут достигать 10 см, контакты жил и прожилков резкие (рис. 2 А). Из второстепенных минералов в кварце встречаются шеелит, топаз и флюорит.

Пирротин в ассоциации встречается очень редко в виде единичных овальных включений в арсенопирите в пределах гранитоидов и в существенных количествах распространен в ороговикованных породах атканской свиты, в экзоконтакте штока Ачча (рис. 2 G).

Арсенопирит образует агрегаты идиоморфных кристаллов. Размеры отдельных кристаллов до 1 см, форма уплощенно-призматическая, внутреннее строение зональное, зонально-блоковое, зернистое. Изредка встречается Со-содержащий арсенопирит (до 8 ат. % Со). По данным атомно-абсорбционного анализа содержание золота в арсенопирите этой ассоциации составляет около 20 г/т, а серебра – до 250 г/т.

Леллингит как правило содержится в виде крупных (до 1мм) удлиненных включений в арсенопирите (рис. 3 А-В), иногда образуя тесные прорастания с арсенопиритом.

Состав арсенопирита и сосуществующего с ним леллингита представлен на рисунке 4. Причем, на рудопроявлении Ачча арсенопирит более мышьяковистого состава (рис. 4b). Содержание серы в леллингите до 8 ат. %.

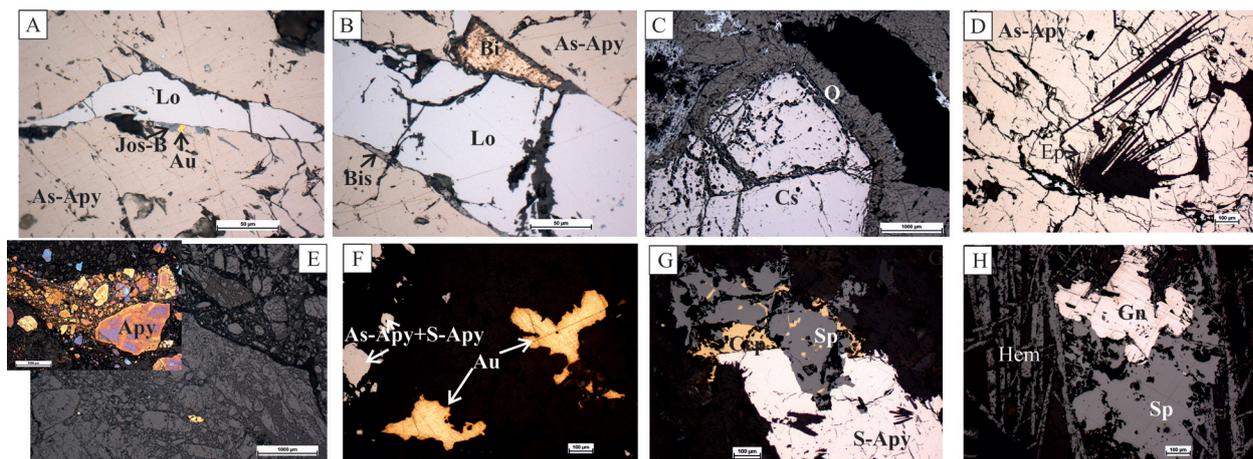


Рис. 3. Минералы и минеральные ассоциации руд. А-В – парагенезис As-Apy+Lo с включениями висмутовых минералов и золота по контактам и дефектам основных фаз (обр. 2253/В-86). С – касситерит – кварцевая ассоциация (обр. 2/Т-88). D – As-Apy+Lo пронизан игольчатыми агрегатами эпидота (36/Т-88). E – полистадийная брекчия содержит вкрапленность интенсивно катаклазированного арсенопирита (обр. 33/Т-88). F – крупные включения самородного золота в брекчированном жильном образовании (обломки – кварц, флюорит) с арсенопиритом различного состава (обр. 27/Т-88). G – полисульфидная ассоциация с S-Apy (обр. 24/Т-88). H – поздняя полисульфидно-гематит-кварцевая ассоциация (обр. 43/Т-88).

Fig. 3. Minerals and mineral associations of ores. A-B – paragenesis of As-Apy+Lo with inclusions of bismuth minerals and gold by contacts and defects of the main phases (2253/B-86). C – cassiterite-quartz association (2/T-88). D – As-Apy+Lo is permeated with needle-like aggregates of epidote (36/T-88). E – multi-stage breccia contains inclusions of intensely cataclastic arsenopyrite (33/T-88). F – large inclusions of native gold in a brecciated vein formation (fragments - quartz, fluorite) with arsenopyrite of various compositions (27/T-88). G – polysulfide association with S-Apy (24/T-88). H – late polysulfide-hematite-quartz association (43/T-88).

С арсенопиритом и леллингитом тесно ассоциируют минералы висмута и теллура. А также почти на всех касситерит-кварцевых объектах (Бутугычаг, Ачча, Харанское, Верхне-Хатыннахское) установлена субмикроскопическая вкрапленность низкопробного самородного золота, локализованная как в кварце, так и в арсенопирите в сростании с висмутовыми минералами. Эти минералы, как правило, образуют мелкую (до 0.0μ м) вкрапленность в сульфоарсенидах, приуроченную либо к контактам арсенопирита и леллингита, либо к микродефектам в зернах (рис. 3 А-В). На рудопроявлении Ачча сульфотеллуриды висмута распространены значительно шире, их характеристика приводится по результатам изучения только этого объекта.

По составу выделяются следующие фазы: самородный висмут, висмутин, иконолит, тетрамит, жозеит-В и ингодит (?) (таблица 2).

Взаимоотношения сульфотеллуридов с сульфидами цветных металлов не наблюдались.

Основная масса касситерита приурочена к полевошпат-кварцевым жильным образованиям, слагающим главные рудные тела. Строение жил и прожилков обычно симметрично-зональное (от контактов к центру): полевошпат→кварц+касситерит→карбонат+флюорит. Изредка в осевой части отмечаются галенит и пирит. Касситерит образует короткопризматические кристаллы темно-коричневого цвета. В качестве элементов-примесей в нем содержится Ti, Fe и W. На основании состава и морфологии касситерита можно предполагать только одну его генерацию. Взаимоотношения этой ассоциации с более поздними образованиями проявлены редко. Иногда касситерит катаклазирован.

На месторождении Бутугычаг наряду с касситерит-кварцевым оруденением распространены сульфидно-настурановые жилы и прожилки сопровождающие хлоритизацию. Мощность зон хлоритизации с кварцевыми прожилками, вкрапленностью и гнездами сульфидных минералов достигает десятков сантиметров. Арсенопирит в них образует идиоморфные, иногда игольчатые кристаллы и их скопления (до 10–20 об.%) размером до 1.5 см, а также арсенопирит встречается в брекчиях и жилах халцедоновидного кварца чаще всего без сростаний с сульфидами. В некоторых случа-

ях он ассоциирует с пиритом и (или) марказитом и еще реже цементируется агрегатом пирротина. Состав арсенопирита смещен в сернистую область – 29.8–32.1 ат. % As (рис. 4 а). В случае наложения этой минерализации на более ранние образования (арсенопирит+леллингит, касситерит) наблюдается катаклаз ранних ассоциаций (рис. 3 G), а в образцах присутствует арсенопирит широкого спектра состава (29.8–35.4 ат. % As).

Таблица 2. Химический состав Te-Bi- минералов (обр. 2286/В-86), мас. %.
 Table 2. Chemical composition of Te-Bi- minerals (sam. 2286/В-86), wt. %.

	Bi	Te	S	Pb	Sb	As	Se	Сумма	Кристаллохимическая формула
Висмутин									
1	79.8	0.0	18.6	0.0	0.3	0.2	0.1	99.0	$\text{Bi}_{1.97}\text{S}_{3.00}\text{Sb}_{0.01}\text{As}_{0.01}$
2	80.4	0.1	19.4	0.0	0.0	0.0	0.2	100.1	$\text{Bi}_{1.94}\text{S}_{3.06}$
3	79.9	0.0	18.8	0.3	0.0	0.0	0.0	99.0	$\text{Bi}_{1.97}\text{Pb}_{0.01}\text{S}_{3.02}$
4	81.7	0.0	18.3	0.0	0.3	0.4	0.0	100.7	$\text{Bi}_{2.03}\text{S}_{2.94}\text{Sb}_{0.01}\text{As}_{0.06}$
Икунолит									
5	84.9	1.3	8.7	0.0	0.0	1.0	0.1	96.0	$\text{Bi}_{4.06}\text{Te}_{0.10}\text{S}_{2.71}\text{As}_{0.13}$
Тетрадимит									
6	58.3	33.4	4.9	0.0	0.2	0.0	0.0	96.8	$\text{Bi}_{2.01}\text{Te}_{1.88}\text{S}_{1.10}\text{Sb}_{0.01}$
7	58.4	32.2	4.8	0.9	0.1	0.0	0.1	96.5	$\text{Bi}_{2.04}\text{Te}_{1.84}\text{Pb}_{0.03}\text{S}_{1.09}\text{Sb}_{0.01}$
Жозеит В									
8	75.8	21.3	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	99.7	$\text{Bi}_{4.16}\text{Te}_{1.91}\text{S}_{0.93}$
Ингодит(?)									
9	64.6	26.4	5.2	0.4	0.4	0.0	0.0	97.0	$\text{Bi}_{1.81}\text{Te}_{1.23}\text{Pb}_{0.01}\text{S}_{0.93}\text{Sb}_{0.02}$
10	72.0	25.9	5.2	0.0	0.1	0.4	0.0	103.6	$\text{Bi}_{1.92}\text{Te}_{1.13}\text{S}_{0.91}\text{As}_{0.03}$
11	75.2	18.3	6.1	0.0	0.1	0.7	0.1	100.7	$\text{Bi}_{2.03}\text{Te}_{0.81}\text{S}_{1.08}\text{As}_{0.06}$

Примечание. Анализ выполнен на микрозонде «Camebax». Условия съемки – 20 кВ, время интегрирования сигнала – 3с, аналитические линии: S – Kα; Sb, Te, As, Se – Lα; Bi, Pb – Mα.
 Аналитик Меркулов Г.А. СВКНИИ ДВО РАН.

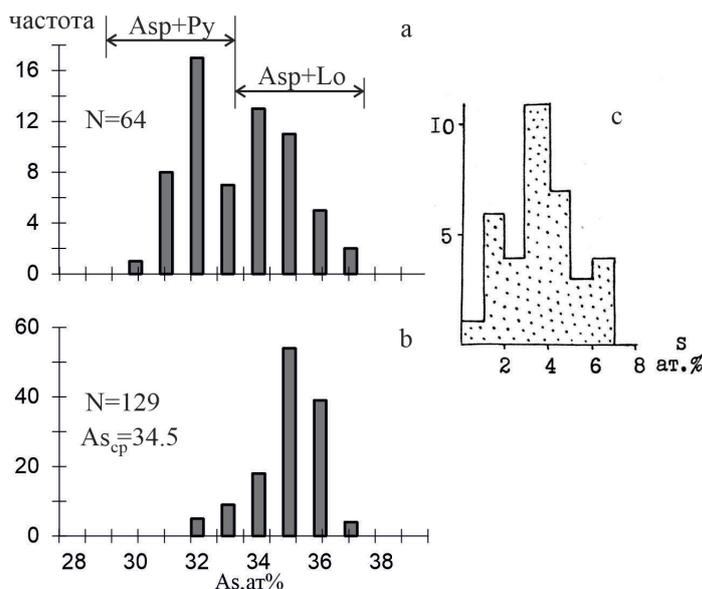


Рис. 4. Распределение содержаний As в арсенопирите (а, б) и S в леллингите (с).
 а – Бутугычагское месторождение; б – рудопоявление Ачча.

Fig. 4. Distribution of As in arsenopyrite (a, b) and distribution of S in lellingite (c). a – Butugychag deposit; b – Achcha ore occurrence. c – Distribution of sulfur in lellingite.

Наиболее поздней является *полисульфидная* ассоциация, сопровождающая хлоритизацию (рис. 2 F и 3 F), а также жилы халцедоновидного и друзовидного кварца с флюоритом и гематитом (рис. 2 I и 3 I). Рудная составляющая представлена хаотически распределенными пирротином, пиритом, марказитом, сфалеритом, станнином, халькопиритом, галенитом (рис. 3 F).

Элементы-примеси в сульфидных главных ассоциаций

Арсенопириты из различных парагенезисов отличаются по содержанию элементов-примесей. Так, в арсенопирит-леллингитовом парагенезисе постоянно присутствует ^{209}Bi (включения висмутых фаз), ^{121}Sb , ^{125}Te и ^{197}Au , ^{107}Ag (рис. 5).

В арсенопирите полисульфидной ассоциации наблюдается незначительное обогащение элементами-примесями (^{121}Sb , ^{209}Bi , ^{65}Cu , ^{182}W) внешних зон кристалла (рис. 6), ^{107}Ag установлено в виде следов, а золото отсутствует.

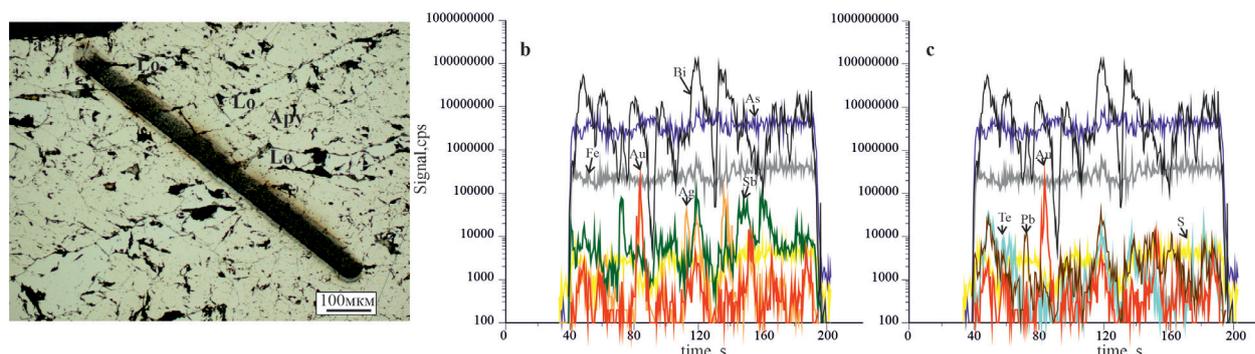


Рис. 5. Элементы-примеси по профилю срастания арсенопирит-леллингит, рудопоявление Ачча, (2253/В-86). Коэффициенты корреляции Au-Ag = 0.7; Bi-Au = 0.8; Pb-Sb = 0.9. Колебания содержаний: ^{107}Ag – до 140 ppm; ^{197}Au – 1.78-213.3 ppm; ^{121}Sb – 50-350 ppm, высокие содержания висмута и теллура обусловлены микровключениями минеральных фаз.

Fig. 5. Trace elements according to the fusion profile of arsenopyrite-lellingite, ore occurrence of Achcha, (2253/V-86). Correlation coefficients Au-Ag = 0.7; Bi-Au = 0.8; Pb-Sb = 0.9. Fluctuations in the contents: ^{107}Ag – up to 140 ppm; ^{197}Au – 1.78-213.3 ppm; ^{121}Sb – 50-350 ppm, high concentrations of bismuth and tellurium are due to microinclusions of mineral phases.

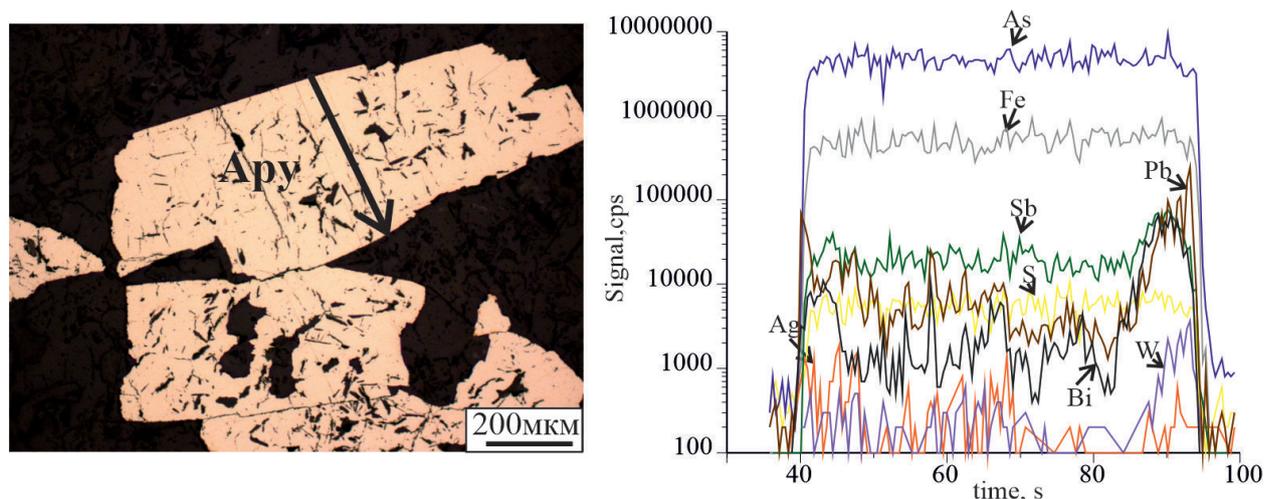


Рис. 6. Элементы-примеси по профилю арсенопирита полисульфидной ассоциации. Месторождение Бутугычаг, (24/Т-88). Коэффициенты корреляции: Sb-Bi = 0.8; Pb-W = 0.9; Bi-Pb = 0.6. Содержания ^{107}Ag = 5.81 ppm, ^{121}Sb до 413 ppm, ^{182}W = 2.66 ppm, среднее содержание ^{209}Bi около 7 ppm.

Fig. 6. Trace elements according to the profile of arsenopyrite polysulfide association. Butugychag deposit, (24/T-88). Correlation coefficients: Sb-Bi = 0.8; Pb-W = 0.9; Bi-Pb = 0.6. Amount of trace elements: ^{107}Ag = 5.81 ppm, ^{121}Sb is up to 413 ppm, ^{182}W = 2.66 ppm, average quantity ^{209}Bi is about 7 ppm.

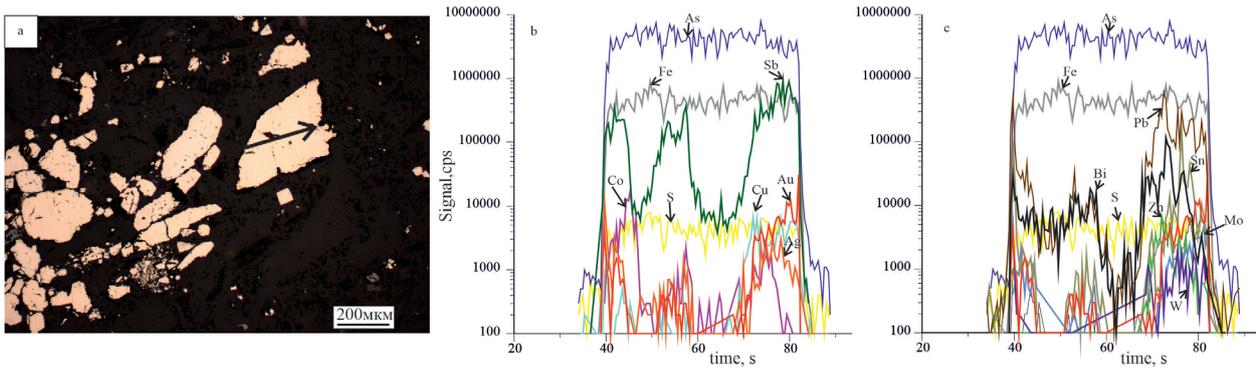


Рис. 7. Распределение и содержания элементов-примесей в образце с совмещенными парагенезисами, интенсивным катаклазом арсенопирита (а) и вкрапленностью самородного золота (27/T-88). Коэффициенты корреляции: Au-Sb = 0.7; Au-Mo = 0.8; Au-Ag = 0.4; Ag-Pb = 0.6; Ag-Sb = 0.6; Ag-W = 0.8; Sb-Mo = 0.8; Pb-Bi = 0.6. Содержания: ^{197}Au – 3.5-70.7 ppm; ^{107}Ag – 1-34 ppm; ^{121}Sb – от 178ppm до 0.8 мас. %; ^{118}Sn до 308 ppm; ^{182}W до 11.5 ppm; ^{95}Mo до 101 ppm.

Fig. 7. Distribution and content of trace elements in a sample with combined parageneses, intense cataclasis and inclusions of native gold (27/T-88). Correlation coefficients: Au-Sb = 0.7; Au-Mo = 0.8; Ag-Pb = 0.6; Ag-Sb = 0.6; Ag-W = 0.8; Sb-Mo = 0.8; Pb-Bi = 0.6. Amount of trace elements: ^{197}Au – 3.5-70.7 ppm; ^{107}Ag – 1-34 ppm; ^{121}Sb – from 178 ppm to 0.8 wt.%; ^{118}Sn to 308 ppm; ^{182}W to 11.5 ppm; ^{95}Mo to 101 ppm.

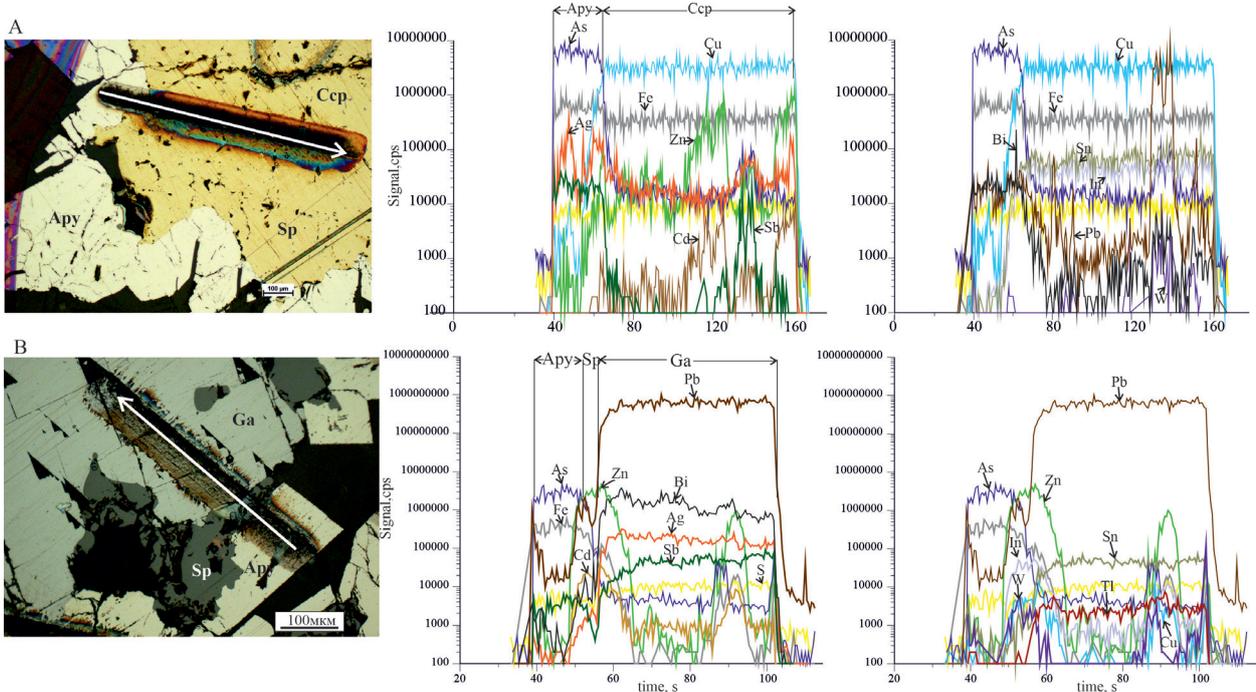


Рис. 8. Распределение элементов-примесей в сростаниях: А – арсенопирит-халькопирит со «звездчатыми» включениями сфалерита (36/T-88, I – этап), В – арсенопирит-галенит (40/T-88, III – этап). Коэффициенты корреляции в сростании «А»: Cu-In = 0.9; Cu-Sn = 0.8; As-Ag = 0.6; As-Sb = 0.9; As-Bi = 0.6; Zn-Cd = 0.9. Содержания в арсенопирите ^{107}Ag до 0.12 мас. %, ^{121}Sb до 307 ppm. Содержания в халькопирите ^{107}Ag до 0.1 мас. %, ^{115}In – 225–260 ppm, ^{118}Sn – 0.19 мас. %, ^{182}W до 17.7 ppm. Коэффициенты корреляции в сростании «В»: Pb-Ag = 0.9; Pb-Bi = 0.8; Pb-Sb = 0.9; Pb-Sn = 0.96; Pb-Tl = 0.9; Zn-In = 0.9; Zn-Cd = 0.9. Содержания элементов-примесей в галените: ^{107}Ag до 0.4 мас. %, ^{118}Sn = 230–250 ppm, ^{121}Sb = 107–567 ppm, ^{209}Bi до 0.9 мас. %, ^{205}Tl – до 8 ppm; в сфалерите содержится ^{115}In – 250 ppm, ^{111}Cd – 1.1 мас. %.

Fig. 8. Distribution of trace elements in aggregates: A – arsenopyrite-chalcopyrite (36/T-88, I-stage), B – arsenopyrite-galena (40/T-88, III – stage). Correlation coefficients in aggregate «A»: Cu-In = 0.9; Cu-Sn = 0.8; As-Ag = 0.6; As-Sb = 0.9; As-Bi = 0.6; Zn-Cd = 0.9. The content in arsenopyrite is ^{107}Ag up to 0.12 wt. %, ^{121}Sb up to 307 ppm. The content in chalcopyrite is ^{107}Ag up to 0.1 wt. %, ^{115}In – 225–260 ppm, ^{118}Sn – 0.19 wt. %, ^{182}W up to 17.7 ppm. Correlation coefficients in aggregate «B»: Pb-Ag = 0.9; Pb-Bi = 0.8; Pb-Sb = 0.9; Pb-Sn = 0.96; Pb-Tl = 0.9; Zn-In = 0.9; Zn-Cd = 0.9. The content of trace elements in galena: ^{107}Ag up to 0.4 wt. %, ^{118}Sn = 230–250 ppm, ^{121}Sb = 107–567 ppm, ^{209}Bi up to 0.9 wt. %, ^{205}Tl – up to 8 ppm; sphalerite contains ^{115}In – 250 ppm, ^{111}Cd – 1.1 wt. %.

В случае пространственного совмещения разных ассоциаций и проявления признаков катаклаза арсенопирита (рис. 2 Е), в его зернах отмечаются повышенные зонально-распределенные содержания примесей ^{197}Au ($+^{107}\text{Ag}$), ^{121}Sb , ^{209}Bi , ^{208}Pb и ^{59}Co (рис. 7 б, с). И, самое главное, здесь появляется вкрапленность самородного золота размером до 300 мкм (рис. 3 Н).

В полисульфидных ассоциациях пройдены спектральные профили через сростания арсенопирита с халькопиритом (золото-редкометалльного этапа) и арсенопирита с галенитом (сульфидно-настуранового этапа) (рис. 8 А и В). В сростании с халькопиритом серебро, сурьма и висмут предпочтительней концентрируются в арсенопирите, а в халькопирите наблюдается равномерное содержание ^{118}Sn и ^{115}In и локально появляются следы ^{182}W (рис. 8 А). Примесь ^{66}Zn и ^{111}Cd обусловлена, очевидно, микровключениями сфалерита.

В случае сростания арсенопирита с галенитом примеси серебра, сурьмы и висмута концентрируются в галените (рис. 8 В). К ним в небольших количествах присоединяется ^{205}Tl , а локально повышенные содержания примеси ^{182}W , ^{115}In и ^{111}Cd отчетливо приурочены к микровключениям сфалерита.

Заключение

Таким образом, анализ минералогических особенностей касситерит-кварцевого месторождения Бутугычаг показывает сложную историю развития гидротермального процесса, а оруденение штока Ачча, по-видимому, является локальным проявлением раннего этапа рудообразования, причем, с более ранним возрастом вмещающих гранитоидов $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar} - 83 \pm 0.4$ млн. лет (датировка, Ворошин и др. 2004), а возраст гранитоидов Бутугычага по данным тех же исследователей составляет $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar} - 78$ млн. лет.

Для месторождения Бутугычаг характерна смена структурного плана ранних и поздних гидротермальных образований, развитие интенсивного катаклаза руд, разные парагенетические ассоциации арсенопирита: с леллингитом и пиритом (Тюкова, Ворошин, 2007). По неопубликованным данным (Еремин и др., 1990, отчет) характерен широкий температурный диапазон ($150-550^\circ\text{C}$) для постмагматических высоко концентрированных флюидов хлоридного состава. Изотопный состав серы арсенопирита и леллингита ($\delta^{34}\text{S}$) изменяется от -3.1 до -3.6, пирротина от -3.1 до -3.9 и молибденита -5.2.

По данным (Heinrich, Eadington, 1986) для оловорудных месторождений совместное отложение касситерита и арсенопирита в интервале температур $340-400^\circ\text{C}$ может происходить в соответствии со следующей окислительно-восстановительной реакцией:



И отдельно касситерит может отлагаться по реакции:



Следовательно, при высокой активности кислорода схема отложения минералов такая: касситерит \rightarrow арсенопирит + пирит + сульфиды полиметаллов; а при низкой активности: касситерит + арсенопирит \rightarrow пирротин + сульфиды полиметаллов.

В нашем случае ассоциация арсенопирит-леллингит, по-видимому, образовалась при более высоких температурах и в более восстановительных условиях. Примесь золота до 213 ppm (и серебра 130 ppm соответственно) содержится в арсенопирит-леллингитовой ассоциации и не обнаружена в арсенопирите полисульфидной ассоциации (обр. 24/Т-88). В укрупненном самородном виде (до 300 мкм) золото наблюдается при пространственном совмещении раннего этапа с мышьяковистым арсенопиритом и более поздней полисульфидной минерализации с сернистым арсенопиритом (обр. 27/Т-88). Для минералов позднего этапа (главным образом галенита) характерна равномерная примесь серебра 0.1–0.4 мас. %. Возможно, изначально золото концентрируется в мышьяковистом арсенопирите (+леллингит) в процессе грейзенизации и в дальнейшем, в случае пространственного совмещения гидротермальных этапов происходит его перераспределение и укрупнение.

Работа выполнена в рамках базовых тем НИР ИГЕМ и НГИЦ РАН.

Литература

1. Гамянин Г.Н. Минералогические аспекты формационно-генетического анализа золоторудных месторождений Верхояно-Колымской складчатой области. Автореф. дис. д.г.-м.н. М. 1991. 50 с.
2. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г., Колесниченко П.П., Зайцев А.И., Диман Е.Н., Бердников Н.В. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. Магадан. Изд-во: СВКНИИ ДВО РАН. 2003. 196 с.
3. Гончаров В.И. Гидротермальное рудообразование в краевых вулканогенных поясах. М. Изд-во: Наука. 1983. 215 с.
4. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов северо-востока Азии. Магадан. Изд-во: СВКНИИ ДВО РАН. 1998. 210 с.
5. Еремин Р.А., Шахтыров В.Г., Ворошин С.В., Тюкова Е.Э., Ворцепнев В.В. Отчет по теме «Поиски коренных месторождений золота в связи с малыми интрузиями юго-восточной части Яно-Колымской складчатой области». Магадан. 1990. (Рукопись).
6. Тюкова Е.Э. Ворошин С.В. Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах Верхне-Колымского региона (к интерпретации генезиса сульфидных ассоциаций). Магадан. Изд-во: СВКНИИ ДВО РАН. 2007. 108с.
7. Флеров Б.Л. Оловорудные месторождения Яно-Колымской складчатой области. Новосибирск. Изд-во: Наука. 1976. 284 с.
8. Шило Н.А., Сидоров А.А., Найборodin В.И. и др. Золоторудные формации Северо-Востока СССР // ДАН СССР. 1969. Т. 188. № 4. С. 901–904.
9. Heinrich C.A., Eadington P.J. Thermodynamic Predictions of the Hydrothermal Chemistry of Arsenic, and Their Significance for the Paragenetic Sequence of Some Cassiterite-Arsenopyrite-Base Metal Sulfide Deposits // *Econ. Geol.* 1986. V. 81. No. 3. P. 511–529. DOI:10.2113/GSECONGEO.81.3.511.
10. Olga V. Vikent'eva, Vsevolod Yu. Prokofiev, Gennadiy N. Gamyamin, Nikolay A. Goryachev, Nikolay S. Bortnikov Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids // *Ore Geology Reviews*. V. 102. 2018. P. 240–259. DOI:10.1016/J.OREGEOREV.2018.09.004.
11. Voroshin S.V., Newberry R.J., Lauer P.W. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Au-quartz mineralization in the Upper Kolyma Region (Magadan Oblast, Russia) // *Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, Magmatism and Metallogeny of Active Continental Margins* : Proc. of the Interim IAGOD Conf. Vladivostok, Russia. 1–20 September, 2004. Vladivostok: Dalnauka. 2004. P. 568–571.