

Серебряно-висмутовая минерализация на Сергозерском рудопроявлении золота

Изучена серебряно-висмутовая минерализация, сопровождающая минерализацию золота на Сергозерском рудопроявлении. Установлено, что серебряно-висмутовая минерализация приурочена к дайкам диоритовых порфиров, которые прорывают вулканогенно-осадочные комплексы Стрельнинского зеленокаменного пояса, представленные роговообманковыми и хлорит-актинолитовыми амфиболитами, биотитовыми и двуслюдяными гнейсами лопийского возраста. Размещение серебряно-висмутовой минерализации, как и минерализации золота, контролируется зоной окварцевания пород мощностью около 80 м. Кроме того, минералы висмута отмечены на участках брекчирования диоритовых порфиров в пределах той же зоны метасоматических преобразований. В составе серебряно-висмутовой минерализации установлены самородные металлы (висмут, электрум, серебро), теллуриды (хедлейит, гессит), селениды (икунолит), сульфиды и сульфосоли висмута и серебра (матильдит, лиллианит, эккерит, ялпайт, прустит, акантит, а также недиагностированные минеральные фазы). Для всех минеральных фаз висмута и серебра характерна ассоциация с галенитом. Состав минерализации претерпел эволюцию от ранних к поздним стадиям ее развития по мере увеличения интенсивности метасоматических преобразований. Наиболее ранними минералами являются самородный висмут Bi и хедлейит Bi_7Te_3 , образующие вкрапленность в галените, и электрум с содержанием золота 30–45 мас.%. Позднее по самородному висмуту развивались сульфосоли серебра и висмута, сульфиды висмута, а также самородное серебро. К наиболее поздним низкотемпературным образованиям относятся сульфиды серебра (эккерит, ялпайт, акантит); эти минералы отмечены только в наиболее интенсивно окварцованных породах. Поскольку формирование минерализации серебра и висмута связано с теми же процессами метасоматического преобразования пород, что и минерализации золота, то находки серебряно-висмутовой минерализации можно рассматривать как положительный поисковый признак при поисковых работах на золото в регионе.

Ключевые слова: Сергозерское рудопроявление золота, висмут, серебро, теллуриды, сульфосоли.

Введение

Минерализация висмута (самородный висмут, висмутотеллуриды, сульфиды и сульфосоли висмута) нередко сопровождает золоторудную минерализацию разных генетических типов золоторудных месторождений, в том числе и в восточной части Фенноскандинавского щита. Так, самородный висмут, висмутин, разнообразные теллуриды висмута и гессит отмечены на золоторудном порфировом месторождении Лобаш-1 в Лехтинской структуре в Карелии [1]. Самородный висмут, матильдит, висмутотеллуриды и гессит были установлены в Койкарской структуре в Центральной Карелии в кварцевых жилах на Койкарском рудопроявлении, отнесенном к орогеническому мезотермальному типу [2; 3]. Характерны минералы висмута для золотосодержащих колчеданных месторождений, например, теллуриды висмута известны в колчеданных рудах месторождения золота Рыбозеро в Южно-Выгозерском зеленокаменном поясе [4] и в колчеданных рудах уже упомянутого Койкарского проявления [2].

Минералы висмута описаны и на золотосодержащих рудопроявлениях в Кольском регионе. Самородный висмут и лиллианит были обнаружены на медно-молибден-порфировом рудопроявлении Пеллапах в зеленокаменном поясе Колмозеро – Воронья [5]. Большое разнообразие минеральных видов висмутотеллуридов установлено на Панареченском рудопроявлении золота в южной части раннепротерозойского зеленосланцевого пояса Имандра – Варзуга [6].

Известны находки серебряно-висмутовой минерализации в восточной части раннепротерозойского зеленосланцевого пояса Имандра – Варзуга и в его обрамлении [7–9]. Авторы указанных публикаций рассматривали эту минерализацию как признак вероятных проявлений золота в кварцевых жилах пояса Имандра – Варзуга и во вмещающих их неоархейских комплексах. Но данному предположению в некоторой степени противоречило отсутствие минерализации серебра и висмута в пределах рудопроявления золота Ворговый – единственного известного в данном районе на конец прошлого века золоторудного объекта.

В последние годы в южном обрамлении пояса Имандра – Варзуга было установлено и изучено Сергозерское рудопроявление золота [10], в пределах которого достаточно широко проявлена и серебряно-висмутовая минерализация. Геологическая информация, полученная по данному объекту, позволяет оценить связь между проявлениями золота, с одной стороны, и минерализацией серебра и висмута – с другой, и приблизиться к ответу на вопрос, может ли действительно серебряно-висмутовая акцессорная минерализация рассматриваться в качестве признака минерализации золота.

Геологическое строение Сергозерского рудопроявления золота

Сергозерское рудопроявление золота расположено в пределах Стрельнинского зеленокаменного пояса в юго-восточной части Кольского полуострова в верхнем течении реки Б. Варзуга. Детально геологическое строение района работ и самого рудопроявления рассмотрено нами ранее [10]. Золоторудная минерализация на рудопроявлении контролируется пачкой метавулканитов основного-ультраосновного состава мощностью около 150 м в толще биотитовых и двуслюдяных гнейсов и сланцев. Первичная природа метавулканитов по химическому составу отвечает коматиитам, коматиитовым и толеитовым базальтам (снизу вверх по разрезу пачки), а вмещающие их гнейсы и сланцы представляют собой метапелиты [11]. Стратиграфически вулканогенно-осадочные толщи участка отнесены к имандровской серии верхнего лопия [12]. Уровень метаморфизма пород достигает верхней части зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фации [13].

Метавулканиты и метаосадки прорываются дайками диоритовых порфиров мощностью до 20 м (рис. 1). Дайки секут вмещающие амфиболиты и двуслюдяные гнейсы под острым углом, контакты даек резкие, неровные, извилистые. Диоритовые порфиры рассланцованы, но при этом хорошо сохранили первичную порфировую текстуру. Основная мелкозернистая ткань породы биотит-кварц-плагиоклазового состава, порфировые вкрапленники размером до 1.5 мм представлены олигоклазом, их форма округлая либо неправильная, часто видна зональность, которая подчеркивается вторичными изменениями минерала. Состав пород отвечает риолитам и дацитам толеитовой серии [10].

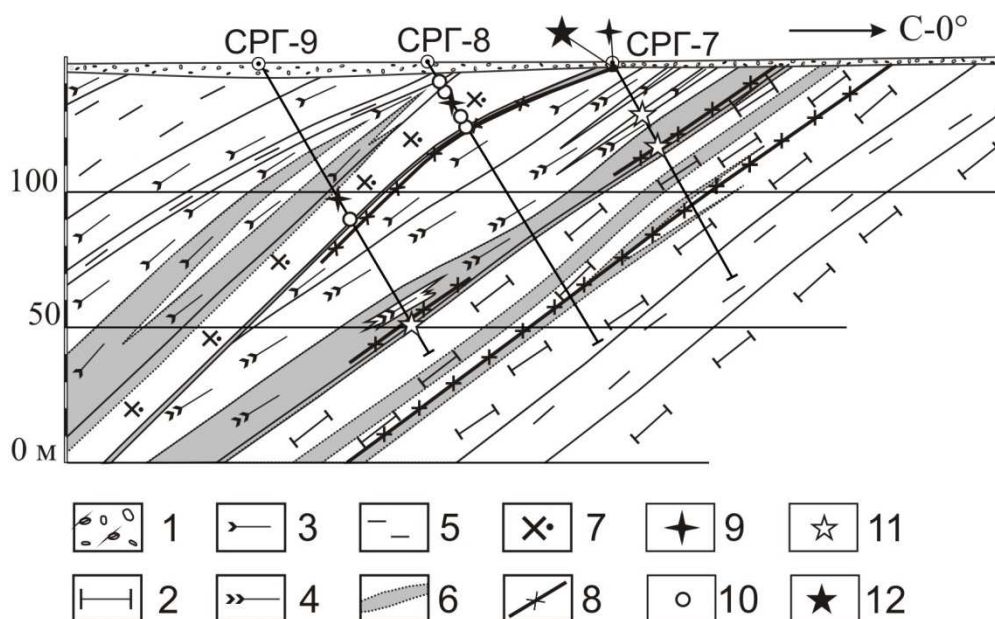


Рис. 1. Проявления висмутовой минерализации на разрезе Сергозерского рудопроявления (по данным бурения ОАО "ЦКЭ" [10]). Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – хлорит-актинолитовые амфиболиты (коматиитовые базальты) и тальк-хлорит-актинолитовые сланцы (метакоматииты); 3 – роговообманковые и клинозоизит-роговообманковые амфиболиты (толеитовые базальты); 4 – карбонатизированные и окварцованные ("полосчатые") роговообманковые амфиболиты; 5 – мусковит-биотит и биотитовые плагиосланцы; 6 – зоны интенсивного метасоматического изменения пород (хлорит-кальцитовые, биотит-кальцитовые, биотитовые, кварцевые и другие метасоматиты, часто графитсодержащие); 7 – диоритовые порфиры; 8 – то же, вне масштаба; 9 – проявления минерализации висмута; 10–12 – содержание золота: 10 – 0.5–1.0 г/т; 11 – 1.0–5.0 г/т; 12 – > 5 г/т

Fig. 1. Bismuth mineralization in the cross section of the Sergozerskoe gold occurrence (according to drilling by СКЕ [10]). Legend: 1 – Quarternary sediments; 2 – actinolite-chlorite amphibolite (komatiitic basalt) and actinolite-chlorite-talc schist (metakomatiite); 3 – hornblendite and clinozoisite-hornblendite amphibolite (toleitic basalt); 4 – carbonatized and silicificated ("banded") hornblendite amphibolite; 5 – biotite-muscovite and biotite plagiосchist; 6 – zones of intensive alteration of rocks (calcite-chlorite, calcite-biotite, biotite, quartz, and other metasomatites, often graphite-bearing); 7 – diorite porphyry dykes, 8 – diorite dykes, out of scale; 9 – findings of bismuth mineralization; 10–12 – gold grades: 10 – 0.5–1.0 ppm; 11 – 1.0–5.0 ppm; 12 – > 5 ppm

В средней и верхней части разреза метавулканитов хлорит-актинолитовые (коматиитовые базальты) и роговообманковые (толеитовые базальты) амфиболиты тектонизированы (смяты в мелкие складки) и интенсивно метасоматически изменены. Мощность зоны метасоматического изменения составляет около 80 м (рис. 1). Преобладающим процессом в нижней части этой зоны является развитие биотита, который замещает амфибол и хлорит, и кальцита по плагиоклазу и амфиболу; биотит-кальцитовые метасоматиты развиваются как по хлорит-актинолитовым и роговообманковым амфиболитам, так и по диоритовым порфирам. Выше по разрезу в роговообманковых амфиболитах отмечается развитие наложенных хлорита и кальцита, здесь широко проявлено окварцевание и карбонат-кварцевое прожилкование. Метасоматически измененные породы (как метавулканиты, так и диоритовые порфиры) содержат вкрапленность арсенопирита и герсдорфита (последний концентрируется только в ультраосновных разностях), с которой связана минерализация золота.

Окварцованные породы характеризуются полосчатой текстурой, в них мелко- и среднезернистые полосы кварца чередуются с тонкими реликтовыми прослойками тонкозернистых пород субстрата – роговообманковых или хлорит-актинолитовых амфиболитов, огнейсованных диоритовых порфиритов, двуслюдяных гнейсов и сланцев. По времени проявления это более поздний процесс, чем развитие биотит-кальцитовых и хлорит-кальцитовых метасоматитов. Окварцевание проявлено интенсивно в биотитовых и двуслюдяных гнейсах и сланцах, а также в роговообманковых амфиболитах, значительно слабее – в хлорит-актинолитовых амфиболитах и сланцах по ним. Интенсивное окварцевание сопровождается развитием кварцевых и карбонат-кварцевых прожилков, прожилки мощностью до 1 см составляют часто свыше 10 об.%. С кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами и прожилками связаны перекристаллизация и переотложение пирротиновой и арсенопиритовой минерализации во вмещающих жильные образования породах, а также формирование галенит-арсенопиритовой с висмутом наложенной минерализации в окварцованных диоритовых порфирах.

Зоны брекчирования вскрыты скважинами на разных уровнях разреза в двуслюдяных гнейсах-метапелитах (как ниже, так и выше пачки амфиболитов) и в прорывающих их дайках диоритовых порфиров (биотитовые гнейсы). Брекчиеподобные текстуры установлены также в амфиболитах, разбитых густой сетью хлоритовых и/или карбонатных прожилков. Видимая мощность зон брекчирования в скважинах не превышает 3 м; установить элементы их залегания и увязать между собой зоны брекчирования на скважинных разрезах не удалось. В брекчиях обломки гнейсов неправильной, часто угловатой формы размером до нескольких сантиметров сцементированы тонкозернистым жильным материалом, состоящим из карбоната, хлорита, эпидота и кварца. Обломки составляют 80–90 об.% породы. Более крупные пустоты заполнены поздним кварцем с характерными для выполнения трещин структурами роста минерала (рис. 2, В) либо кальцитом. Формирование брекчий связывается с неоднократным развитием гидротермального прожилкования, что подтверждается увеличением количества гидротермальных прожилков во вмещающих породах по мере приближения к зоне брекчирования. Но в то же время несомненна роль поздней тектоники, поскольку отмечено разное направление сланцеватости в соседних обломках гнейсов в пределах одного шлифа (рис. 2, А).

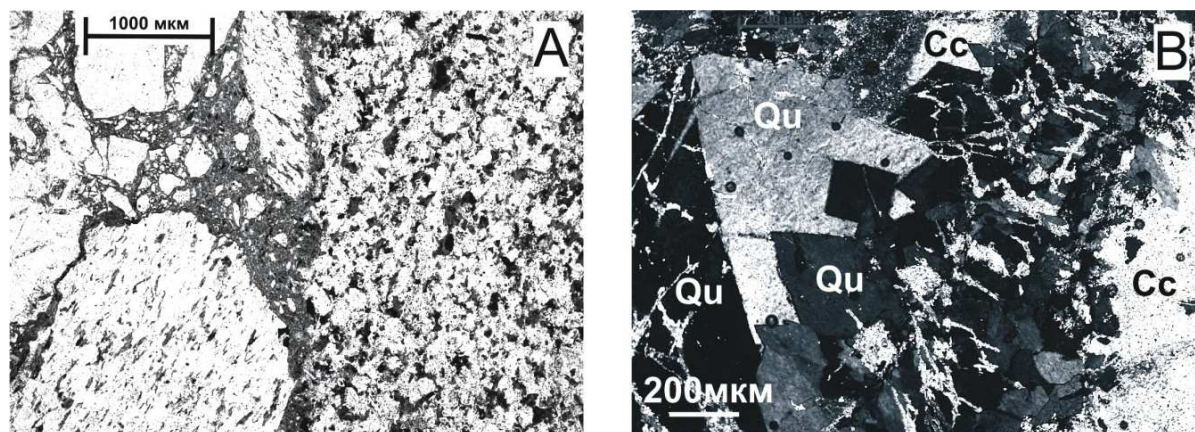


Рис. 2. Брекчия рассланцованного диоритового порфира (скважина СРГ-6, глубина 101.5 м):

А – различная ориентировка сланцеватости в обломках диоритовых порфиров; В – структуры роста кристаллов кварца при выполнении полости в брекчии

Fig. 2. Breccia of schistose diorite porphyry (DDH СРГ-6, depth 101.5 m): А – different orientation of schistosity in diorite porphyry fragments; В – growth structures of quartz crystals, filling empties in breccia

Материалы и методы

Изучение состава рудной минерализации проводилось в аншлифах, изготовленных из сколков керна скважин. Кроме того, специально для исследования серебряно-висмутовой минерализации отобраны пробы из керна скважины СРГ-8 с интервалов 16.0–17.0 и 17.0–17.7 м, где было установлено повышенное содержание висмута и серебра (табл. 1). Пробы представляют собой рассланцованные двуслодные диоритовые порфиры, в разной степени измененные. Первая проба (из верхнего интервала) содержит кварцевые прожилки мощностью до нескольких сантиметров, которые составляют около 10 % объема породы. Во второй пробе насыщенность карбонат-кварцевыми прожилками повышается до 30 %, мощность прожилков – до 10 см.

Химический анализ керновых проб выполнен методом ICP AS в ОАО "Иргиредмет", г. Иркутск. В табл. 1 приведены данные по содержанию тех рудных элементов, которые связаны с серебряно-висмутовой минерализацией. Содержание золота определено там же методом пробирного анализа с окончанием ICP AS.

Из дробленого материала проб после отмучивания было взято по 2 навески массой 200–300 г, которые разделены на фракции по удельному весу и магнитности. Для обеих проб был выполнен полуколичественный минералогический анализ (аналитики В. И. Басалаева и Н. Г. Орешкова) (табл. 1).

Таблица 1. Результаты химического и минералогического анализа пород с висмутовой минерализацией
Table 1. Results of chemical and mineralogical assaying of rocks with bismuth mineralization

Номер скважины		СРГ-6	СРГ-7	СРГ-8	СРГ-8
Интервал глубины	от	101.50	2.45	16.00	17.00
	до	102.60	2.65	17.00	17.70
Содержание рудных элементов, г/т					
Au		<0.005	16.90	0.77	0.73
Ag		<1	34.4	15.0	13.2
As		2	15920	2470	874
Bi		<3	92.3	33.6	29.0
Cd		<2	56.0	<2	<2
Co		39	26	6	7
Cr		406	907	15	106
Cu		134	38	25	111
Ni		243	49	3	5
Pb		33	4757	750	621
S		14 100	11 925	7 357	14 600
Te		<5	<5	<5	<5
Zn		199	2 111	53	221
Полуколичественный минералогический анализ, об. %					
Кварц	Не выполнялся	Не выполнялся	66.8	66.5	
Полевые шпаты				8.7	
Хлорит				0.2	
Карбонаты				6.1	
Биотит				7.1	
Мусковит				24.9	
Гранат				0.1	
Циркон				Знаки	
Монацит				Знаки	
Апатит				Редкие знаки	
Шеелит				Редкие знаки	
Рутил				Редкие знаки	
Анагаз				Единичные знаки	
Титанит				Знаки	
Пирротин				1.2	
Пирит				Знаки	
Арсенопирит				0.3	
Галенит				0.1	
Марказит				Знаки	
Халькопирит				Знаки	
Сфалерит	Знаки				
Пентландит	Единичные знаки				
Молибденит	Единичные знаки				

После выполнения минералогического анализа из обеих проб отобраны концентраты сульфидных минералов, из которых изготовлены искусственные аншлифы. В искусственных аншлифах и аншлифах керн скважин минеральные фазы Bi и Ag изучались с помощью оптического микроскопа и на электронном микроскопе LEO-1450, а оценка состава фаз выполнена на энергодисперсионном спектрометре Bruker XFlash-5010 (аналитик Е. Э. Савченко).

Результаты и обсуждение

Арсенопирит-галенитовая с висмутом минерализация установлена в зонах окварцевания и брекчирования диоритовых порфиров (рис. 1); вне даек диоритовых порфиров подобная минерализация отмечена не была. Основные рудные минералы – галенит, арсенопирит, пирит, пирротин, сфалерит, реже встречаются халькопирит и молибденит. Сульфидные минералы приурочены к кварцевым прожилкам, где выделяются в виде цепочек зерен либо образуют микропрожилки по границам зерен кварца. Содержание рудных минералов составляет 1–5 мас.%, размер зерен до 1 мм.

В окварцованных диоритовых порфирах состав рудной минерализации эволюционирует в зависимости от степени изменения породы. В пробе относительно слабо измененных пород легкая фракция (кварц, полевые шпаты, преимущественно плагиоклаз, хлорит, кальцит) составляет 66.8 %, здесь высоко содержание мусковита (табл. 1). На долю сульфидных минералов приходится менее 2 об.% пробы, в составе минерализации преобладают пирротин (1.2 об.%) и арсенопирит (0.3 об.%). Во второй пробе интенсивно окварцованных диоритовых порфиров минералы легкой фракции составляют 81.5 об.%, в том числе кварц – 66.5 %. Сульфидная минерализация – около 5 об.% пробы, в составе минерализации преобладает пирит (~60 % от объема сульфидной фракции), высоко также содержание пирротина, арсенопирита и галенита. В химическом составе породы это отражается в двукратном увеличении содержания серы по сравнению со слабо измененными порфирами и в снижении содержания мышьяка (табл. 1). Таким образом, от менее к более измененным разностям диоритовых порфиров повышается содержание сульфидной фракции (до 5 об.%), в ее составе существенно возрастает доля пирита при менее значимых вариациях содержания остальных рудных минералов.

Приведенный в табл. 1 состав пробы из скважины СРГ-7 характеризует интервал 20 см, нацело сложенный кварцевым прожилком с гнездово-прожилковой сульфидной минерализацией, в том числе и с видимым золотом (электрум). Химический состав пробы отличается высоким содержанием Bi, Au, Ag, Pb, Zn, Cd, а содержание Cu, Co, Ni низкое. В составе минерализации установлены галенит, арсенопирит, сфалерит, пирротин, самородный висмут, матильдит.

Проба из скважины СРГ-6 – это брекчированные диоритовые порфиры. По содержанию малых элементов брекчированные диоритовые порфиры весьма близки к малоизмененным разностям этих пород, за исключением высокого содержания S и несколько повышенного Pb. В составе минерализации этих пород преобладают пирит и пирротин, второстепенные минералы – халькопирит, сфалерит, а также галенит. Галенит с микровключениями висмутовых минералов отмечен в кварц-кальцитовом агрегате, выполняющем полость в брекчированной породе. Содержание серебра в породе низкое (ниже чувствительности анализа), и, как следствие, минеральные фазы серебра в этой пробе не установлены.

Самородные металлы

Минералы ряда золото – серебро установлены в окварцованных диоритовых порфирах. Они представлены преимущественно членами изоморфного ряда, богатыми серебром, вплоть до самородного серебра (табл. 2). При этом в пробе относительно слабо измененных диорит-порфиров отмечается электрум с содержанием золота 30–45 мас.%, а в пробе сильно окварцованных диоритовых порфиров установлено самородное серебро, в котором содержание примеси золота 2.8–3.5 мас.% (табл. 2). Зерна серебра и электрума ксеноморфные, размером чаще всего менее 10 мкм, максимально 25 мкм. Выделения благородных металлов располагаются в краевой части зерен галенита. Если галенит обрастает зерна арсенопирита (или, реже, пирита), то включения электрума и серебра располагаются на границе галенит – арсенопирит (рис. 3). Отмечено также развитие самородных серебра (или электрума) вместе с галенитом и с висмутом по трещинам в арсенопирите. В составе электрума кроме золота и серебра отмечена незначительная примесь железа, в самородном серебре присутствует примесь сурьмы (табл. 2).

Самородный висмут образует преимущественно эмульсионную вкрапленность в галените (рис. 3), более крупные (до 70 мкм) выделения, аналогично электруму и серебру (часто вместе с ними), тяготеют к краевым частям зерен галенита. В составе самородного висмута выявлена незначительная примесь сурьмы (табл. 2).

Теллуриды и селениды

Гессит Ag_2Te отмечен как микровыделение размером около 5 мкм в ассоциации с самородным серебром в трещине в зерне арсенопирита из пробы сильно измененных диоритовых порфиров. Примесь железа в гессите может быть связана с возбуждением зондом вмещающего арсенопирита (табл. 2).

Хедлейит Bi_7Te_3 установлен в виде собственных и полиминеральных (с самородным висмутом) включений и вростков размером менее 10 мкм в галените из зоны брекчирования диоритовых порфиров.

Собственный минерал селена выявлен только один – это икунолит (микровыделение размером около 2 мкм в сростании с галенитом). Вероятно, развитие икунолита связано с отличительной чертой состава галенита из зоны брекчирования, для которого характерна примесь селена ~0.4 мас.%. Примесь селена до 0.85 мас.% отмечается и в других минералах, ассоциирующих с галенитом – в сульфидах висмута и в хедлейите.

Таблица 2. Химический состав самородных металлов, теллуридов и селенидов висмута и серебра, мас.%
Table 2. Chemical composition of native metals, bismuth and silver tellurides and selenides, mass.%

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Fe		2.29	0.33		0.32	1.44	0.83	0.3	1.63				3.7
Cu				0	0	0	0	0	0.44				0.82
Ag			95.94	95.21	92.99	60.26	54.02	69.18	62.36				58.93
Au			3.01	2.83	3.00	38.3	45.15	30.52	35.57				
Bi	99.25	97.71								84.08	79.99	80.06	
Pb			0.45							1.02	0.3	0	
Sb	0.75			1.96	2.07								
S			0.28		1.63					8.96	1.09		
Se										5.94	0.15	0.14	
Te											18.47	19.81	36.55
Сумма	100	100	100.01	100	100.01	100	100	100	100	100	100	100.01	100
Коэффициент кристаллохимической формулы													
Fe			0.007		0.006	0.033	0.020	0.007	0.037				0.231
Cu						0.000	0.000	0.000	0.009				0.045
Ag			0.965	0.966	0.907	0.717	0.672	0.800	0.727				1.907
Au			0.016	0.016	0.016	0.250	0.308	0.193	0.227				
Bi	0.987	0.919								3.403	6.357	7.320	
Pb			0.002							0.042	0.024	0.000	
Sb	0.013	0.081		0.018	0.018								
S			0.010		0.053					2.364	0.564		
Se										0.636	0.033	0.034	
Te											2.403	2.966	1.000

Примечание: 1, 2 – самородный висмут; 3–5 – самородное серебро; 6–9 – электрум; 10 – икунолит; 11, 12 – хедлейит; 13 – гессит. Кристаллохимические формулы самородных металлов рассчитаны на сумму атомов, равную 1, хедлейита и икунолита – на сумму анионов, равную 3, гессита – на 1 атом Te.

Сульфиды и сульфосоли висмута и серебра

Сульфиды и сульфосоли висмута и серебра развиваются чаще всего в краевой части зерен галенита в виде каймы вокруг выделений самородного висмута (рис. 3).

В брекчированных диоритовых порфирах выявлены минеральные фазы висмута с соотношением элементов, не соответствующим известным минералам: Bi_5S_4 и $\text{Cu}_3\text{Bi}_8\text{S}_{12}$.

В окварцованных диоритовых порфирах по висмуту развиваются сульфиды и сульфосоли, содержащие серебро. В относительно слабо измененных диоритовых порфирах формируются эккерит $\text{Ag}_2\text{CuAsS}_3$ и ялпаит Ag_3CuS_2 (рис. 3). В интенсивно окварцованных породах наиболее широко распространен матильдит, кроме того встречается прустит, а в единичных случаях отмечены лиллианит и аргентопирит (или штернбергит?).

Размер выделений матильдита не превышает 15 мкм. Состав минерала варьирует по соотношению серебра и висмута, для многих выделений матильдита (проанализировано свыше 10 зерен) характерен некоторый дефицит катионов (табл. 3).

Прустит отмечен в сростаниях с галенитом и матильдитом; этот минерал образует гипидиоморфные зерна размером до 25 мкм, в отраженном свете голубовато-серого цвета, с темно-красными внутренними рефлексами. Отклонение кристаллохимической формулы прустита от стехиометрического соотношения элементов (табл. 3) объясняется особенностями микронзондового анализа этого минерала: как и некоторые другие сульфосоли серебра, прустит разлагается под воздействием электронного зонда, и содержание Ag и As изменяется. В составе прустита установлена примесь меди (около 2 мас.%).

Акантит – наиболее поздний по времени образования минерал; он развивается по самородному серебру, электруму, матильдиту, замещая мелкие выделения этих минералов нацело, а крупные – в виде

каймы (рис. 3). При этом видно, что зерно серебра от каймы акантита отделено тончайшим прослоем углеродистого вещества (видимо, графита) толщиной менее 1 мкм (рис. 3).

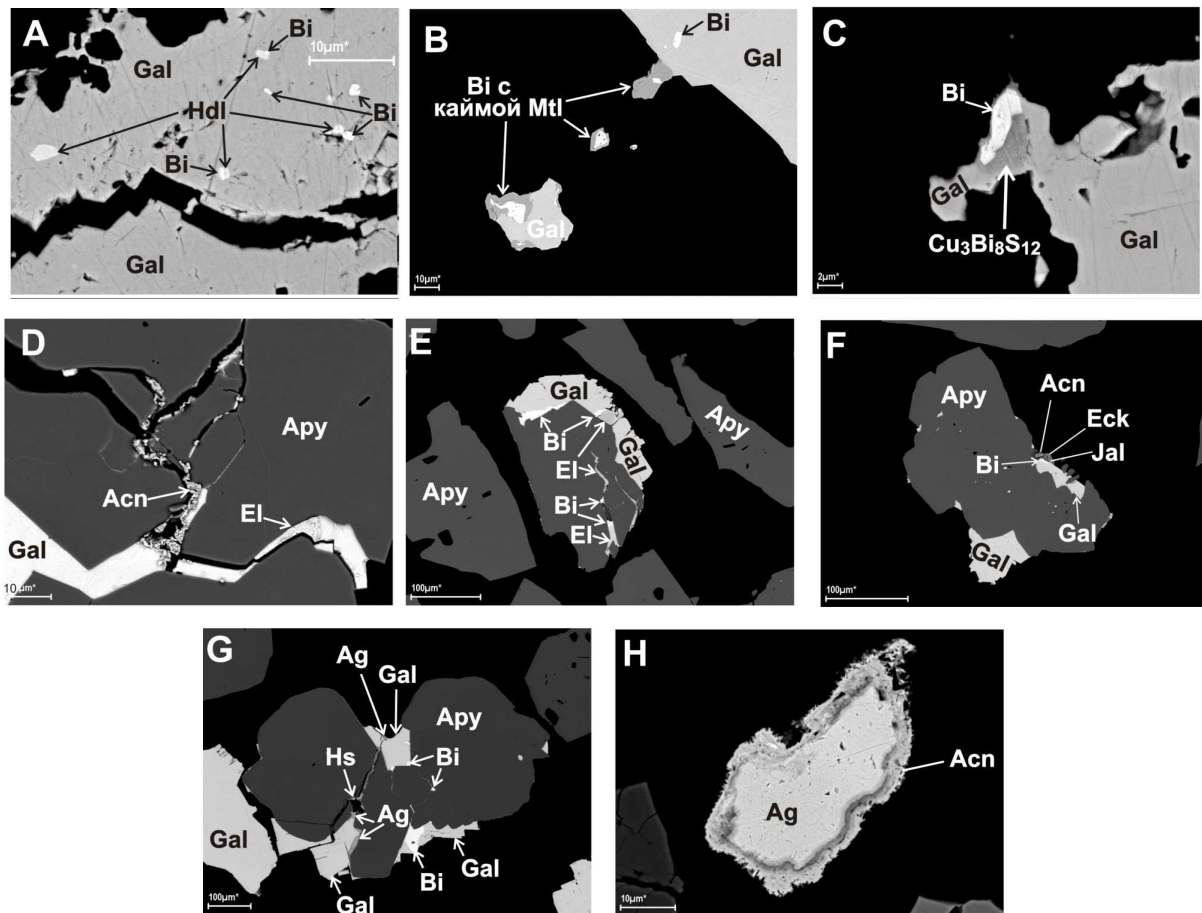


Рис. 3. Формы выделения минералов висмута и серебра в измененных диоритовых порфирах Сергозерского рудопоявления (изображения в обратно-рассеянных электронах): А – вкрапленность самородного висмута и хедлейита в галените из зоны брекчирования диоритовых порфиров; В – матильдит, развивающийся в виде каймы по самородному висмуту; С – сульфид меди и висмута, развивающийся в виде каймы по самородному висмуту; D – электрум, галенит и акантит, развивающиеся по трещине в арсенопирите; E – висмут и электрум на границе галенита с арсенопиритом и по трещине в последнем; F – эккерит, ялпаит и акантит в краевой части зерна галенита, замещающегося поздним арсенопиритом; G – самородные серебро, висмут и гессит на границе галенита и арсенопирита; H – кайма акантита вокруг зерна самородного серебра; темная полоса по границе серебра и акантита – зона, обогащенная углеродом (графит?). Сокращения минералов: Асн – акантит; Ag – серебро самородное; Ару – арсенопирит; Bi – висмут самородный; Eck – эккерит; El – электрум; Gal – галенит; Hdl – хедлейит; Hs – гессит; Jal – ялпаит; Mtl – матильдит

Fig. 3. Bismuth and silver minerals in altered diorite porphyry of the Sergozerskoe gold occurrence (BSE-photo): A – dissemination of native bismuth and hedleyite in galena from the zone of brecciation; B – matildite as a rim around native bismuth; C – Cu and Bi sulfide as a rim around native bismuth; D – electrum, galena, and acanthite in the fracture in arsenopyrite grain; E – bismuth and electrum at arsenopyrite-galena boundary and in the fracture in arsenopyrite; F – eckerite, jalpaite, and acanthite in galena, partly substituted by arsenopyrite of late generation; G – native silver, bismuth, and hessite at the galena-arsenopyrite boundary; H – rim of acanthite around native silver grain, dark zone at the boundary of acanthite with native silver is enriched in carbon (graphite?). Abbreviations of minerals: Acn – acanthite; Ag – native silver; Apy – arsenopyrite; Bi – native bismuth; Eck – eckerite; El – electrum; Gal – galena; Hdl – hedleyite; Hs – hessite; Jal – jalpaite; Mtl – matildite

Таблица 3. Химический состав сульфидов и сульфосолей висмута и серебра, мас. %
Table 3. Chemical composition of sulfides and sulfosalts of bismuth and silver, mass. %

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fe		0.44			0.15	1.17	2.03	0.58		0.59	35.69	33.87		
Ni										0.19		1.09		
Cu	1.35			2.04	0	15.61	16.48	0.46	1.02				8.59	
Ag	26.69	28.63	13.05	65.80	65.83	69.10	47.16	84.52	79.4	70.46	35.34	33.95		
Au								1.28						
Bi	54.36	54.03	21.89							12.48	0.31		73.43	89.03
Pb			48.83						5.27		4.36	5.41	0.18	0
As				13.46	15.12		13.33							
S	17.6	16.9	16.22	18.70	17.42	14.12	21.00	13.16	14.3	16.28	24.3	25.69	16.95	10.84
Se													0.85	0.13
Сумма	100	100	99.99	100	98.52	100	100	100	99.99	100	100	100.01	100	100
Коэффициент кристаллохимической формулы														
Fe					0.014	0.095	0.167	0.025		0.021	2.530	2.271		
Ni										0.007		0.070		
Cu	0.077	0.030		0.165	0.000	1.115	1.188	0.018	0.036				3.008	
Ag	0.902	1.007	1.435	3.138	3.369	2.910	2.003	1.909	1.651	1.287	1.297	1.178		
Au								0.016						
Bi	0.948	0.981	1.242							0.118	0.006		7.818	5.016
Pb			2.795						0.057		0.084	0.098	0.019	
As				0.924	1.114		0.815							
S	2.000	2.000	6.000	3.000	3.000	2.000	3.000	1.000	1.000	1.000	3.000	3.000	11.760	3.981
Se													0.240	0.019

Примечание: 1, 2 – матильдит; 3 – лиллианит; 4, 5 – прустит; 6 – ялпаит; 7 – эккерит; 8, 9 – акантит; недиагностированные фазы сульфидов серебра и висмута: 10 – висмутсодержащий сульфид серебра (акантит?); 11, 12 – аргентопирит (штернбергит?); 13 – сульфид меди и висмута $Cu_3Bi_8(S, Se)_{12}$; 14 – сульфид висмута Bi_5S_4 . Кристаллохимические формулы акантита рассчитаны на 1 атом S, матильдита и ялпаита – на 2 атома S, прустита, эккерита, аргентопирита – на 3 атома S, лиллианита – на 6 атомов S, сульфида меди и висмута – на сумму анионов, равную 12, сульфида висмута – на сумму анионов, равную 4.

Для минералов висмута характерно формирование на поздних стадиях развития рудной минерализации в ходе гидротермально-метасоматического преобразования руд после отложения основной массы сульфидов железа (пирротин, пирит, арсенопирит) вместе с халькопиритом, сфалеритом и особенно часто с галенитом, как правило, выполняя трещины в ранних сульфидах, в кварце и карбонатах. Температурный интервал развития минерализации висмута достаточно большой. Так, для теллуридов халькопиритовой фации в колчеданных месторождениях Урала рассчитанные значения температуры попадают в интервал от ~270 до ~450 °C [14]. Оценка температуры формирования ассоциации галенита с гесситом, висмутотеллуридами, золотом и электрумом на месторождении Лобаш-1 указывает на интервал от 270 до 170 °C [1]. Большой интервал температуры формирования минерализации висмута обуславливает многостадийность этого процесса, которая проявляется в образовании структур распада в высокотемпературных сульфидах, замещении одних минеральных фаз другими и в полиморфных превращениях минералов.

Температура образования ранних сульфидов на Сергозерском проявлении согласно арсенопиритовому геотермометру составляла 480–550 °C (что согласуется с температурными условиями регионального метаморфизма) [10], наиболее поздние сульфиды развивались при температуре менее 120 °C (ялпаит устойчив при температуре менее 117 °C) [15].

Наиболее ранний минерал висмута на Сергозерском рудопроявлении – самородный висмут, он формировался при распаде твердого раствора в галените в условиях низкой активности серы и серебра; в противном случае в продуктах распада вместо самородного металла присутствовали бы сульфосоли Pb, Bi, Ag, S, например, лиллианит или матильдит, как это было описано нами на серебряно-висмутовом проявлении на Малых Кейвах в северном обрамлении пояса Имандра – Варзуга [9]. С этой же стадией связано и формирование других интерметаллических соединений – висмутотеллуридов и электрума, встречающихся вместе с висмутом во включениях либо в краевой части зерен галенита.

На более поздней стадии гидротермально-метасоматических преобразований повышение активности S привело к развитию сульфосолей и сульфидов висмута, развивающихся в виде каймы по самородному висмуту. При этом в зонах окварцевания диоритовых порфиров, где повышено содержание серебра, развивался

преимущественно матильдит, реже эккерит и ялпаит, а в зоне брекчирования, где активность серебра низкая, – сульфиды висмута.

На завершающих стадиях в зоне наиболее интенсивного окварцевания диоритовых порфиров развиваются минералы серебра – самородное серебро, прустит и, позднее, акантит.

Распространение минерализации висмута на Сергозерском рудопроявлении золота определяют элементы "метасоматического" и "петрографического" контроля. "Петрографический контроль" – это связь минерализации висмута с дайковыми телами диоритовых порфиров, которые, очевидно, служили источником металлов (висмута и свинца). Вне даек диоритовых порфиров минералы висмута не отмечались. "Метасоматический контроль" выражен в приуроченности минерализации висмута к участкам окварцевания в диоритовых порфирах; процессы метасоматического преобразования пород способствовали "реализации" геохимической специализации диоритовых порфиров в виде собственных минералов висмута.

Процессы окварцевания и развития кварцевых и кальцит-кварцевых прожилков на Сергозерском проявлении затронули не только диоритовые порфиры, но и другие породы в зоне мощностью до 80 м выше контакта хлорит-актинолитовых и роговообманковых амфиболитов. Для окварцованных пород в данной зоне характерна пирротин-пирит-арсенопиритовая минерализация с золотом низкой пробности (электрум с содержанием Au 30.5–65.5 мас.%). Золоторудная минерализация образует серию мелких линз мощностью до 1-2 м с содержанием золота 0.5–2 г/т, причем рудные линзы установлены в разных по составу породах, включая и диоритовые порфиры. Таким образом, минерализация золота в зоне окварцевания распространена шире, чем серебряно-висмутовая минерализация, и ее развитие контролируется только проявлением метасоматических преобразований пород, "петрографический" фактор менее значим.

Для расположенной ниже по разрезу "основной минерализованной зоны", приуроченной к контакту хлорит-актинолитовых и роговообманковых амфиболитов, характерен иной тип метасоматического изменения пород – это биотит-кальцитовые метасоматиты, развивающиеся по различному субстрату, в том числе и по диоритовым порфирам [10]. Золото в "основной минерализованной зоне" высокопробное, в составе минерализации преобладают пирротин, арсенопирит, герсдорфит. Галенит если и присутствует, то лишь в качестве редкого аксессуарного минерала. Висмутовая минерализация здесь неизвестна совсем, даже в метасоматитах по диоритовым порфирам.

Заключение

Как следует из приведенных выше данных, измененные диоритовые порфиры с висмутовой минерализацией и с золотом представляют собой лишь один из элементов достаточно мощной золотоносной зоны в окварцованных породах. Висмутовая минерализация сопровождает один из двух типов минерализации золота, установленных на Сергозерском проявлении, а именно линзовидные тела окварцованных пород с золотом низкой пробности. На Сергозерском проявлении золота этот тип минерализации играет второстепенную роль, но может оказаться важным на других рудных объектах в поясе Имандра – Варзуга и в его обрамлении. Таким образом, минерализация висмута действительно может рассматриваться как положительный признак при поисковых работах на золото, несмотря на то что такая минерализация характерна не для всех золоторудных объектов в этой части Кольского региона.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность главному геологу ОАО "Центрально-Кольская экспедиция" О. В. Казанову и геологу этой экспедиции Г. Ф. Бакаеву за предоставленные геологические материалы, а также сотрудникам ГИ КНЦ РАН В. И. Басалаевой и Н. Г. Орешковой, выполнившим минералогический анализ проб.

Работа выполнена в рамках проекта 0231-2015-0001 и программы ПРАН 1.4.

Библиографический список

1. Кулешевич Л. В., Тытык В. М., Коротаева Н. Н. Минералогия руд и околорудно-измененных пород золото-полиметаллического месторождения Лобаш-1 (Карелия) // Записки Российского минералогического общества. 2004. № 4. С. 39–51.
2. Лавров О. Б., Кулешевич Л. В. Золоторудная минерализация Койкарской структуры, Центральная Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Геология декабря. 2012. № 3. С. 87–99.
3. Иващенко В. И., Голубев А. И., Ибрагимов М. М., Ромашкин А. Е. Золотосодержащее оруденение архея Койкарской структуры: генетическая типизация, минеральные ассоциации, условия образования, перспективы // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Геология декабря. 2014. № 1. С. 39–55.
4. Кулешевич Л. В. Золоторудное месторождение Рыбозеро в Южно-Выгозерском зеленокаменном поясе (восточная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2013. Вып. 16. С. 89–101.
5. Белопицкий А. П., Калинин А. А., Петров С. И. Минералогия и геохимия метасоматитов зон глубинных разломов. Апатиты : КФАН СССР, 1987. 114 с.

6. Чернявский А. В., Волошин А. В., Войтеховский Ю. Л. Золоторудные проявления Панареченской вулcano-тектонической структуры, Кольский регион: типы рудной минерализации // Записки Российского минералогического общества. 2013. № 6. С. 32–45.
7. Клюнин С. Ф., Калинин А. С., Полежаева Л. И. Находка теллуридов в верховьях реки Большая Варзуга (Кольский полуостров) // Роль литолого-стратиграфического, структурного и палеогеографического факторов в формировании месторождений полезных ископаемых на северо-западе РСФСР. М. : МГ РСФСР, 1978. С. 88–91.
8. Гавриленко Б. В., Реженова С. А. Рудные минералы золотосодержащих кварцево-жильных зон // Минеральные парагенезисы метаморфических и метасоматических пород. Апатиты : КФ АН СССР, 1987. С. 58–67.
9. Калинин А. А., Басалаев А. А. Серебряно-висмутовая минерализация кварцевых жил Кейвского блока (Кольский полуостров) // Доклады академии наук СССР. 1992. Т. 325, № 1. С. 142–144.
10. Калинин А. А., Казанов О. В., Бакаев Г. Ф., Савченко Е. Э. Сергозерское рудопроявление золота в Терском зеленокаменном поясе // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона : тр. XII Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской науч. сессии, посвященной 80-летию со дня рождения акад. РАН Ф. П. Митрофанова / ред. Ю. Л. Войтеховский. Апатиты, 6–7 апреля 2015 г. Апатиты, 2015. С. 108–115.
11. Jensen L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks // Ontario Div. Mines. Miss., 1976. 66 p.
12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия "Балтийская". Лист Q_37 – Архангельск. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2012. 302 с.
13. Имандра-Варзугская зона карелид (геология, геохимия, история развития) / под ред. Г. И. Горбунова. Л. : Наука, 1982. 279 с.
14. Молошаг В. П., Грабежев А. И., Гуляева Т. Я. Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфириновых месторождений Урала // Записки Российского минералогического общества. 2002. № 5. С. 40–54.
15. Воган Д. Дж., Крейг Дж. Р. Химия сульфидных минералов. М. : Мир, 1981. 575 с.

References

1. Kuleshevich L. V., Tytyk V. M., Korotaeva N. N. Mineralogiya rud i okolorudno-izmenennykh porod zoloto-polimetallicheskoego mestorozhdeniya Lobash-1 (Kareliya) [Mineralogy of ores and altered host rocks in gold-polymetal deposit Lobash-1 (Karelia)] // Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obschestva. 2004. N 4. P. 39–51.
2. Lavrov O. B., Kuleshevich L. V. Zolotorudnaya mineralizatsiya Koykarskoy struktury, Tsentralnaya Kareliya [Gold mineralization in Koikarskaya structure, Central Karelia] // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. Ser. Geologiya dokembriya. 2012. N 3. P. 87–99.
3. Ivaschenko V. I., Golubev A. I., Ibragimov M. M., Romashkin A. E. Zolotosoderzhashee orudnenie arheya Koykarskoy struktury: geneticheskaya tipizatsiya, mineralnye assotsiatsii, usloviya obrazovaniya, perspektivy [Gold-bearing mineralization in the Archean of the Koikarskaya structure: genetic types, mineral associations, condition of formation, perspectives] // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. Ser. Geologiya dokembriya. 2014. N 1. P. 39–55.
4. Kuleshevich L. V. Zolotorudnoe mestorozhdenie Rybozero v Yuzhno-Vygozerskom zelenokamennom poyase (vostochnaya Kareliya) [The Rybozero gold deposit in South-Vygozersky greenstone belt (Eastern Karelia)] // Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii. 2013. Vyp. 16. P. 89–101.
5. Belolipetskiy A. P., Kalinin A. A., Petrov S. I. Mineralogiya i geokhimiya metasomatitov zon glubinniyh razlomov [Mineralogy and geochemistry of metasomatites in deep fault zones]. Apatity : KFAN SSSR, 1987. 114 p.
6. Chernyavskiy A. V., Voloshin A. V., Voytehovskiy Yu. L. Zolotorudnye proyavleniya Panarechenskoy vulkano-tektonicheskoy struktury, Kolskiy region: tipy rudnoy mineralizatsii [Gold occurrences in the Panarechenskaya volcanic-tectonic structure, Kola region: types of mineralization] // Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obschestva. 2013. N 6. P. 32–45.
7. Klyunin S. F., Kalinkina A. S., Polezhaeva L. I. Nahodka telluridov v verhovyyah reki Bolshaya Varzuga (Kolskiy poluostrov) [Finding of tellurides in the upper stream of Bol'shaya Varzuga river] // Rol litologo-stratigraficheskogo, strukturnogo i paleogeograficheskogo faktorov v formirovaniy mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh na severo-zapade RSFSR. M. : MG RSFSR, 1978. P. 88–91.
8. Gavrilenko B. V., Rezhnova S. A. Rudnye mineraly zolotosoderzhaschih kvartsevo-zhilnykh zon [Ore minerals in gold-bearing quartz vein zones] // Mineralnye paragenezisy metamorficheskikh i metasomaticheskikh porod. Apatity : KF AN SSSR, 1987. P. 58–67.

9. Kalinin A. A., Basalaev A. A. Serebryano-vismutovaya mineralizatsiya kvartsevyh zhil Keyvskogo bloka (Kolskiy poluostrov) [Bismuth-silver mineralization in quartz veins in the Keivy block (Kola Peninsula)] // Doklady akademii nauk SSSR. 1992. V. 325, N 1. P. 142–144.

10. Kalinin A. A., Kazanov O. V., Bakaev G. F., Savchenko E. E. Sergozerskoe rudoproyavlenie zolota v Terskom zelenokamennom poyase [Sergozerskoe gold occurrence in Tersky greenstone belt] // Geologiya i strategicheskie poleznye iskopaemye Kolskogo regiona : tr. XII Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) Fersmanovskoy nauch. sessii, posvyaschennoy 80-letiyu so dnya rozhdeniya akad. RAN F. P. Mitrofanova / red. Yu. L. Voytehovskiy. Apatity, 6–7 aprelya 2015 g. Apatity, 2015. P. 108–115.

11. Jensen L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks // Ontario Div. Mines. Misk., 1976. 66 p.

12. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii [State geological map of Russian Federation]. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya "Baltiyskaya". List Q_37 – Arhangel'sk. Ob'yasnitelnaya zapiska. SPb. : Kartograficheskaya fabrika VSEGEI. 2012. 302 p.

13. Imandra-Varzugskaya zona karelid (geologiya, geohimiya, istoriya razvitiya) [Imandra-Varzuga zone of karelides (geology, geochemistry, history of development)] / pod red. G. I. Gorbunova. L. : Nauka, 1982. 279 p.

14. Moloshag V. P., Grabezhev A. I., Gulyaeva T. Ya. Usloviya obrazovaniya telluridov v rudah kolchedannykh i medno-zoloto-porfirovykh mestorozhdeniy Urala [Conditions of formation of tellurides in massive sulfide and copper-molybdenum-gold porphyry deposits in the Urals] // Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2002. N 5. P. 40–54.

15. Vogan D. Dzh., Kreyg Dzh. R. Himiya sulfidnykh mineralov [Mineral chemistry of metal sulfides]. M. : Mir, 1981. 575 p.

Сведения об авторах

Калинин Аркадий Авенирович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru; Апатитский филиал Мурманского государственного технического университета, кафедра геологии и полезных ископаемых, доцент

Kalinin A. A. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. of Geol. & Miner. Sci., Senior Researcher; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru; Apatity Branch of Murmansk State Technical University, Department of Geology and Mineral Resources, Associate Professor

Савченко Евгений Элланович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, вед. электроник; e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Savchenko Ye. E. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Leading Electronic Engineer; e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

A. A. Kalinin, Ye. E. Savchenko

Bismuth-silver mineralization in the Sergozerskoe gold occurrence

Bismuth-silver mineralization attendant to gold mineralization in the Sergozerskoe gold occurrence has been studied in detail. Bi-Ag mineralization is connected with diorite porphyry dykes, which cut volcanic-sedimentary Lopian complexes of the Strel'ninsky greenstone belt – hornblendite and actinolite-chlorite amphibolites, biotite and bi-micaceous gneisses. Distribution of Bi-Ag mineralization similar to gold mineralization is controlled by 80 m thick zone of silicification. Bi minerals are found in brecciated diorite porphyry. Bismuth-silver mineralization includes native metals (bismuth, electrum, silver), tellurides (hedleyite, hessite), selenides (ikunolite), sulfides and sulfosalts of Bi and Ag (matildite, lillianite, eckerite, jalpaite, prustite, acanthite, a few undiagnosed minerals). All Bi and Ag minerals associate with galena. Composition of mineralization evolved from early to late stages of development, depending on intensity of rock alteration. The earliest Bi-Ag minerals were native bismuth and hedleyite formed dissemination in galena, and electrum with 30-45 mass.% Au. Later native bismuth was partly substituted by silver and bismuth sulfosalts and bismuth sulfides. The latest minerals were low-temperature silver sulfides eckerite, jalpaite, and acanthite, which were noted only in the most intensively altered rocks. As soon as the process of formation of Bi-Ag mineralization is the same as formation of gold, findings of bismuth-silver mineralization can serve as a positive exploration sign for gold in the region.

Key words: Sergozerskoe gold occurrence, bismuth, silver, tellurides, sulfosalts.