

Золото-висмута-теллуридная минерализация на рудопроявлении Верхние Кичаны в Тикшеозерском зеленокаменном поясе

Калинин А. А.^{ID}, Савченко Е. Э.^{ID}

Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, a.kalinin@ksc.ru, ye.savchenko@ksc.ru

Аннотация. Рудопроявления золота Верхние и Средние Кичаны (Тикшеозерский зеленокаменный пояс) приурочены к серии надвигов в ядерной части Кичанской синформной складки. Минерализация на проявлении Верхние Кичаны связана со скаполит-диопсид-кварцевыми с эпидотом и карбонатом метасоматитами по амфиболитам. Метасоматиты интенсивно турмалинизированы и сульфидизированы, содержание пирит-пирротиновой минерализации достигает 10–15 об. %. Золото-висмута-теллуридная минерализация носит наложенный характер: цепочки мелких зерен теллуридов секут сланцеватость породы и полосы, обогащенные пиритом и пирротинном. В составе минерализации теллуридов преобладает теллуридовисмутит, отмечены также цумоит, тетрадимит, алтаит, волинскит, гессит и другие, в том числе фазы теллуридов, не имеющие признанного минерального статуса. Золото встречено в самородном виде, в виде теллуридов петцита и сильванита, а также в виде сульфида золота и серебра ютенбогардтита. Предположительно золото-висмута-теллуридная минерализация формировалась в палеопротерозойское время после пика регионального метаморфизма палеопротерозойского этапа при участии малых интрузий турмалиновых гранитов.

Ключевые слова: Тикшеозерский зеленокаменный пояс, проявление Верхние Кичаны, золото, серебро, теллуриды, висмут.

Au-Bi-Te mineralization in the Verhnie Kichany occurrence, Tiksheozersky greenstone belt

Kalinin A. A.^{ID}, Savchenko Ye. E.^{ID}

Geological Institute, Kola science Centre, Russian Academy of Sciences

Abstract. Gold occurrences Verhnie and Srednie Kichany are located in the Tiksheozersky greenstone belt and controlled by a thrust series in the core part of the Kichany synform fold. In the Verhnie Kichany occurrence, gold mineralization is connected with quartz-diopside-scapolite altered with epidote and carbonate amphibolite. The altered rocks are intensely tourmalinized and contain up to 10–15 vol. % of pyrrhotite and pyrite. Telluride-bismuth-gold mineralization formed later, and chains of telluride grains cut the schistosity of the rocks and pyrrhotite and pyrite crystals. The main telluride mineral is tellurobismuthite, and tsumoite, tetradymite, altaite, volynskite, hessite are more rare. Some tellurides were not identified. Gold was found in native form, in a form of tellurides petzite and sylvanite, and Au-Ag sulfide uytenbogaardtite. Telluride-bismuth-gold mineralization is supposed to form in Paleoproterozoic, after the peak of Paleoproterozoic regional metamorphism, and was triggered probably by minor intrusions of tourmaline granites.

Keywords: the Tiksheozersky greenstone belt, Verhnie Kichany gold occurrence, gold, silver, telluride, bismuth.

Введение

Теллуриды являются типоморфными минералами золотых рудопроявлений, поэтому каждая находка теллуридов привлекает к себе внимание и свидетельствует о перспективности участка на золото. В Кичанской структуре Тикшеозерского пояса теллуриды были выявлены нами впервые на рудопроявлении Верхние Кичаны, при этом установлено, что именно с ними здесь ассоциирует минерализация золота.

Проявления минерализации золота были установлены в 2004–2008 гг. в ходе работ ОАО «КГИЛЦ» и ОАО «МГРЭ» на берегу оз. Верхние Кичаны в пределах Кичанской синформной складки (Калинин и др., 2017). Размах крыльев складки свыше 5 км осевая плоскость субвертикальная северо-западного простирания, шарнир складки погружается к северо-западу под углом около 30°. Юго-западное и северо-восточное крылья складки к востоку от оз. Верхние Кичаны частично сре-

заны разломами северо-западного простирания, фиксирующимися на поверхности зонами интенсивного расланцевания (Калинин и др., 2017). Слагающие складку амфиболиты верхнеозерской и гнейсы хизоварской свиты разбиты на ряд пластин серией надвигов (рис. 1), в обнажениях надвигов проявились в виде интенсивной трещиноватости, расланцевания, метасоматического преобразования пород. Одна из таких надвиговых зон отчетливо прослеживается вдоль берега оз. Верхние Кичаны до оз. Средние Кичаны полосой шириной около 50 м на расстояние свыше 2.5 км (рис. 1). В пределах этой полосы отмечаются линзы интенсивно измененных и сульфидизированных пород мощностью до нескольких метров и протяженностью в десятки и первые сотни метров. К таким линзам метасоматитов приурочены проявления минерализации золота: на юго-восточном берегу озера Верхние Кичаны расположено проявление Верхние Кичаны, а на перешейке, разделяющем озеро Верхние и Средние Кичаны, – проявление Средние Кичаны (рис. 1). Проявление Средние Кичаны было детально описано ранее (Калинин и др., 2017; Калинин, 2018), в настоящей статье приведены новые данные по рудопроявлению Верхние Кичаны.

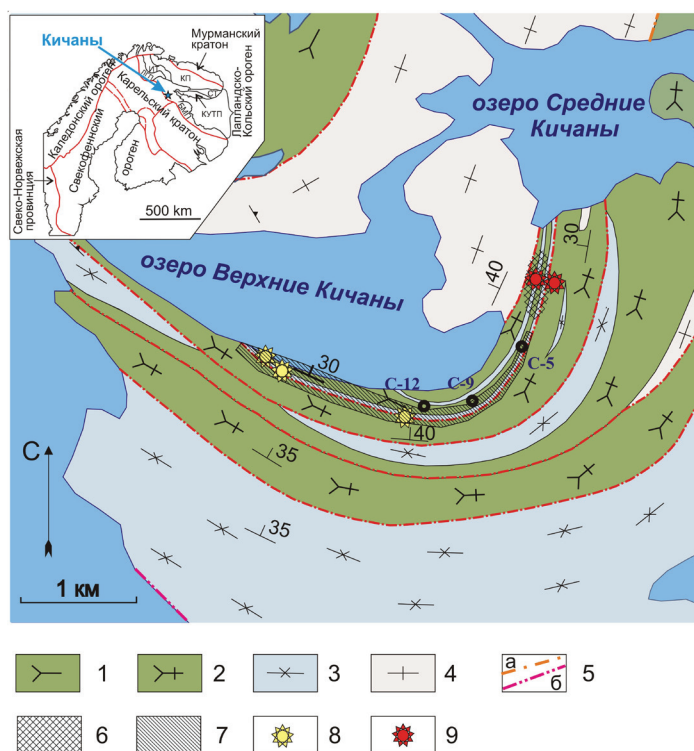


Рис. 1. Схема геологического строения участка проявлений золота Верхние и Средние Кичаны (по Калинин и др., 2017, с изменениями).

1 – гранатовые амфиболиты с прослоями и линзами биотитовых гнейсов, 2 – полевошпатовые амфиболиты, 3 – лейкократовые биотитовые и гранат-биотитовые гнейсы с прослоями и линзами амфиболитов, 4 – плагиомикроклиновые биотитовые гнейсо-граниты и гнейсы беломорского пояса, 5 – линии надвигов (а) и крутопадающих тектонических разрывов (б), 6–7 – участки интенсивного метасоматического преобразования амфиболитов: 6 – скарнирование и сопряженное окварцевание, 7 – скаполитизация, эпидотизация и окварцевание; 8–9 – проявления минерализации золота, более 0.5 г/т: 8 – связанные с пирит-пирротиновой минерализацией в скаполит-диопсид-кварцевых метасоматитах (Верхние Кичаны), 9 – связанные с пирротин-арсенопиритовой минерализацией в кварцевых метасоматитах (Средние Кичаны).

Fig. 1. Schematic geological map of the area of Verhnie and Srednie Kichany gold occurrences (modified after Kalinin et al, 2017).

1 – garnet amphibolite with layers and lenses of biotite gneiss, 2 – feldspar amphibolite, 3 – leucocratic biotite and biotite-garnet gneiss with layers and lenses of amphibolite, 4 – plagiomicrocline biotite granite-gneiss and gneiss of the Belomorian mobile belt, 5 – thrusts (a) and steeply dipping faults (b), 6–7 – areas of intensive alteration: 6 – scarnification with linked silicification, 7 – scapolitization, epidotization, and silicification; 8–9 – gold prospects: 8 – gold in quartz-diopside-scapolite rocks with pyrite-pyrrhotite mineralization, 9 – gold in quartz metasomatite with arsenopyrite-pyrrhotite mineralization.

Материалы и методы

Работа написана на основе каменного материала, собранного авторами в 2010–2012 гг. на участке рудопроявлений Верхние и Средние Кичаны, а также шлифов и аншлифов, отобранных из керна скважин С-5, С-9 и С-12, пробуренных МГРЭ в ходе работ 2004–2008 гг. Керна скважин в настоящее время находится на хранении в Территориальных фондах геологической информации по Мурманской области (г. Апатиты).

Минералогические и петрографические исследования проводились с помощью оптического микроскопа Axioplan, снабженного блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете. Препараты были детально изучены на растровом электронном микроскопе Zeiss Evo-25 (Carl Zeiss), оснащенном энерго-дисперсионным рентгеновским спектрометром AZtec UltimMax-100 (Oxford Instruments). На снимках в режиме обратно-отражённых электронов (BSE) были зафиксированы и идентифицированы все фазы, вызвавшие интерес. Химический состав фаз был определён рентгеноспектральным электронно-зондовым методом с дисперсией рентгеновского излучения по энергии (EDS). Параметры работы прибора: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного зонда 2 нА, время накопления спектров 100 сек. При анализе сульфидов и интерметаллидов использованы следующие аналитические линии (и эталонные вещества): PbMa и TeLa (PbTe) (иногда для TeLa использовался HgTe), BiMa и SeLa (Bi₂Se₃), AsKa (InAs), AgLa (металл), AuMa (металл), FeKa и SKa (пирит) (иногда для FeKa использовался металл), NiKa (металл), CoKa, (металл), ZnKa (металл или сфалерит), BrKa (KBr), CdLa (металл или CdSe)

Результаты исследований

Рудопроявление Верхние Кичаны связано с участками окварцевания и развития скаполит-диопсидовых метасоматитов с эпидотом и титанитом по плагиоамфиболитам (рис. 2), чередующимся с прослоями турмалинизированных биотитовых и гранат-биотитовых гнейсов (рис. 3).

На берегу озера Верхние Кичаны (северо-западный фланг рудопроявления) мощность зоны метасоматического изменения амфиболитов составляет около 2 м, по простиранию она прослеживается в скальном выступе на берегу озера на 50 м и далее уходит под растительный покров. В центральной части и на северо-восточном фланге рудопроявления зона метасоматического изменения пород вскрыта скважинами, ее мощность составляет 3–5 м. Золотосодержащая пирротин-пиритовая минерализация приурочена, главным образом, к толще измененных плагиоамфиболитов (новообразованные скаполит, эпидот, карбонат, кварц, пироксен ряда диопсид-геденбергит, кальциевый амфибол, сульфиды), но захватывает также прослои турмалинизированных биотитовых гнейсов.

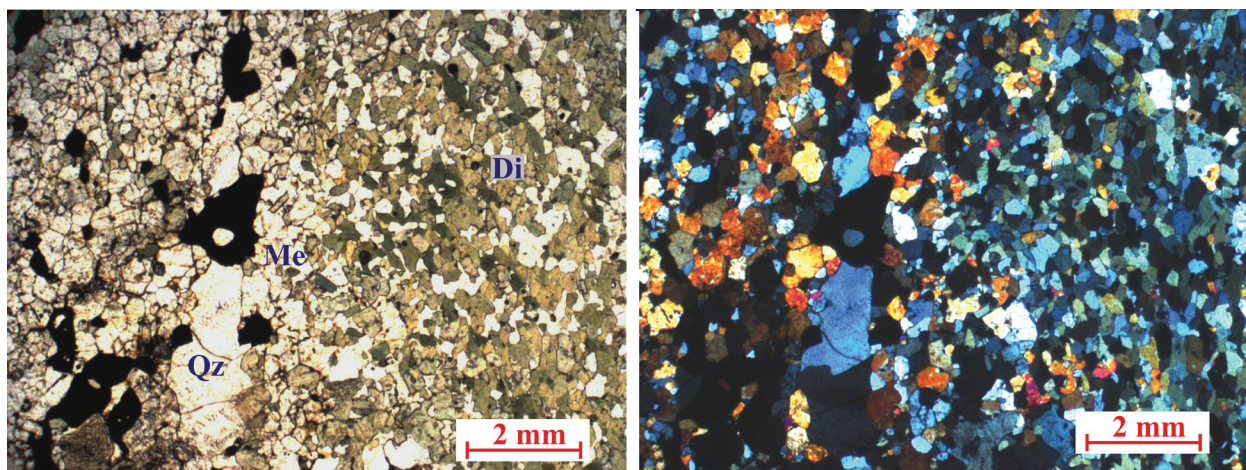


Рис. 2. Окварцевание, скаполитизация и диопсидизация амфиболита, сопровождающиеся развитием сульфидной минерализации. Левый снимок – николи параллельны, правый – скрещены (скаполит мейонит в скрещенных николях желто-оранжевый).

Примечание: здесь и далее буквенные символы минералов даны в соответствии с рекомендациями IMA (Warr, 2021): Aca – акантит, Alt – алтаит, Amp – минерал группы амфиболов, Apy – арсенопирит, Au-Ag – минерал ряда золото – серебро, Cbt – кобальтин, Di – диопсид, Gn – галенит, Hes – гессит, Me – мейонит, Mtd – матильдит, Ptз – петцит, Py – пирит, Pyh – пирротин, Qz – кварц, Sylv – сильванит, Tbi – теллуrowисмутит, Tsm – цумоит, Ttd – тетрадимит, Uyt – ютенбогардит, Vol – волинскит.

Fig. 2. Scapolitization and silicification of amphibolite with development of sulfide mineralization. Thin section photos, without analyzer (left) and with analyzer (right).

Note: symbols of minerals are given according to IMA recommendations (Warr, 2021).

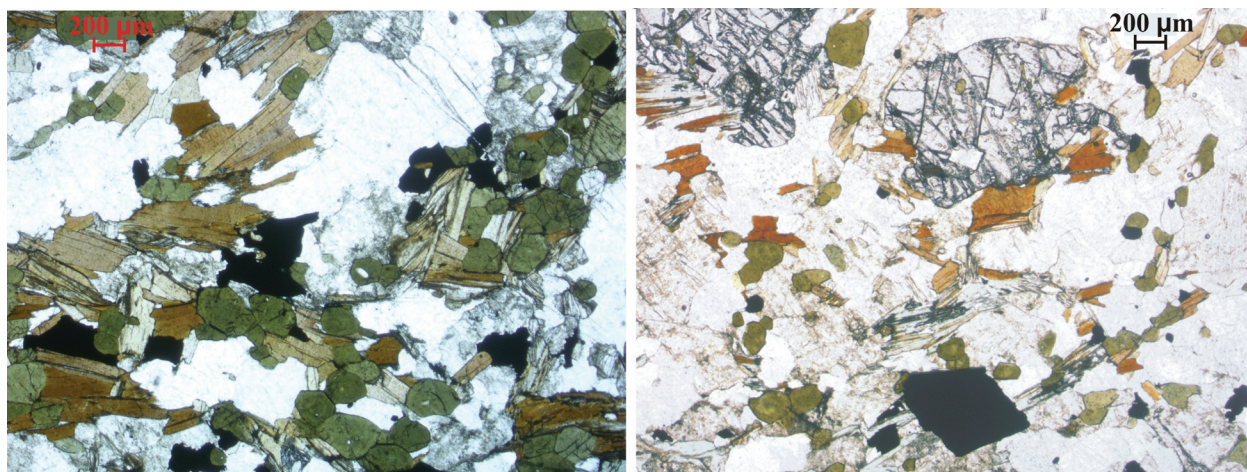


Рис. 3. Развитие гранат-кварцевых метасоматитов и турмалинизация биотитовых гнейсов, сопровождающиеся развитием сульфидной минерализации. Фотографии шлифов, без анализатора.

Fig. 3. Quartz-garnet alteration and tourmalinization with formation of sulfide mineralization in biotite gneiss. Thin sections photos.

Скаполит близок по составу к мейониту (свыше 80 % мейонитового минала), из добавочных анионов в составе минерала преобладают $(\text{SO}_4)^{2-}$ и $(\text{CO}_3)^{2-}$. Пироксен ряда диопсид-геденбергит содержит 32 % геденбергитового и 68 % диопсидового миналов (Калинин и др., 2017). Карбонат представлен кальцитом.

Изменение химического состава породы при развитии скаполит-диопсид-кварцевых метасоматитов незначительное (Калинин и др., 2017): по отношению к исходным плагиоамфиболитам возрастает только содержание $S_{\text{общ}}$ за счет развития мейонита с сульфат-анионом и сульфидной минерализации, содержание других петрогенных элементов остается практически на прежнем уровне (в пределах ошибки определения).

В прослоях биотитовых гнейсах среди амфиболитов отмечается развитие кварц-гранатовых метасоматитов и интенсивная турмалинизация, содержание турмалина может достигать 15–20 об. % (рис. 3). Не исключено, что эти существенно турмалинизированные породы формировались под воздействием турмалиновых плагиомикроклиновых пегматоидных гранитов кичанского комплекса: интенсивная турмалинизация гнейсов была описана нами ранее в экзоконтактной зоне пегматоидных турмалиновых гранитов в районе оз. Бабье (Калинин и др., 2017).

Содержание золота в штучных пробах скаполит-диопсид-кварцевых метасоматитов с пирит-пирротиновой минерализацией составляет 0.63–3.5 г/т, серебра – до 18 г/т.

Содержание рудных минералов в измененных породах обычно составляет 0.5–3 об.%, повышаясь до 10–15 об. % в полосах шириной до 1 см, согласных сланцеватости породы, где существенно возрастает и размер зерен сульфидов от первых десятых долей миллиметра до 2–3 мм. В составе сульфидной минерализации преобладающими рудными минералами являются пирротин и пирит (рис. 4). Основной второстепенный минерал – халькопирит, отмечены редко сфалерит, молибденит, галенит, пентландит, кобальтин, арсенопирит, леллингит, теллуриды висмута, свинца, никеля, серебра и золота, а также самородные золото и висмут. В зоне окисления по сульфидам железа развивается вторичный марказит, по халькопириту – борнит и ковеллин, по галениту и пирротину – акантит, матильдит, висмутин, ютенбогардит.

Пирит более поздний по отношению к пирротину. Пирит содержит примесь мышьяка на уровне примерно 0.1 мас. %, но в некоторых зернах пирита отмечены участки резкого повышения содержания As до 24 мас. % (рис. 4) при сохранении отношения $\text{Fe}/(\text{S}+\text{As}) = 1/2$.

Микровыделения теллуридов и сульфотеллуридов вместе с самородным золотом, а также арсенопиритом, кобальтином, леллингитом, образуют скопления зерен и цепочки, пересекающие

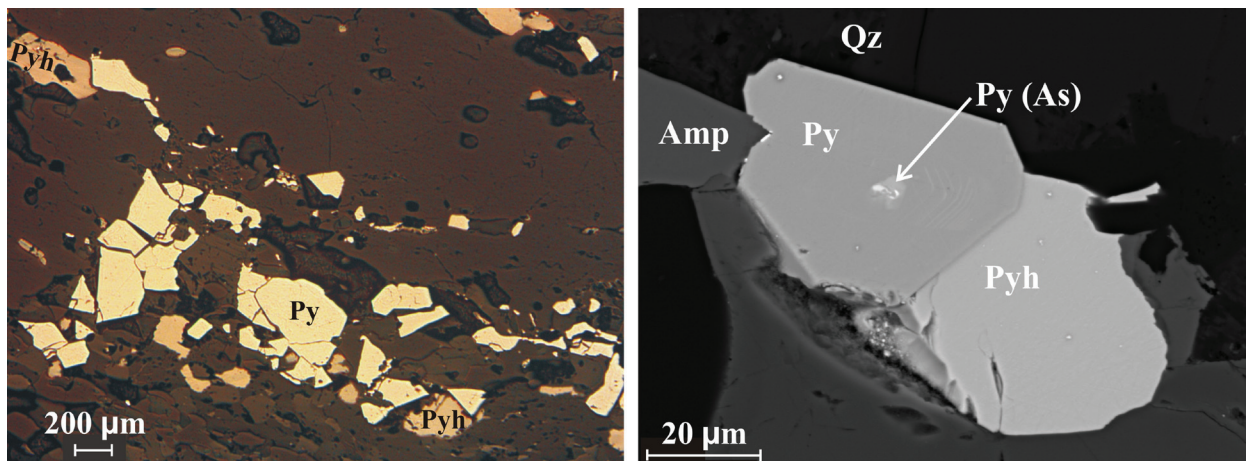


Рис. 4. Слева – развитие пирит-пирротитовой минерализации в измененных амфиболитах, фото аншлифа, без анализатора; справа – участок повышенного (до 24 мас. %) содержания мышьяка в пирите, по границе пирита и амфибола видны микровыделения висмутотеллуридов (ярко белое), фотография в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 4. Left – pyrrhotite-pyrite mineralization in altered amphibolite, polished section photo. Right – pyrite crystal with high arsenic (up to 24 mas. %), with micrograins of bismuth tellurides at the pyrite-amphibole boundary (white), back scattered electron image (BSE image).

сланцеватость в измененных амфиболитах (рис. 5). Форма зерен теллуридов преимущественно удлиненная, пластинчатая, размер зерен, в основном, менее 10 мкм (максимально 50 мкм).

В случае пересечения цепочкой зерен теллуридов зон, обогащенных пиритом, теллуриды выделяются и по трещинам в зернах пирита (рис. 6).

В составе минерализации отмечены теллуриды Bi теллуровисмутит (резко преобладает), цумоит, тетрадимит, Pb – алтаит, Ni – мелонит, Ag – гессит и волинскит, Ag и Au – петцит и сильванит (рис. 7, табл. 1). Кроме того, выявлены недиагностированные фазы теллуридов серебра составов Ag_2BiTe_4 , $AgBi_2Te_4$, $(Ag,Ni)_2Te_3$.

По характеру сростаний теллуридов (рис. 7, 8) можно предположить порядок их развития: самым ранним из теллуридов является тетрадимит, позднее развивались гессит и цумоит, потом теллуровисмутит, волинскит, петцит и сильванит, а последним, по всей видимости, алтаит. После теллуридов развивались сульфиды серебра, висмута и золота – матильдит, висмутин, акантит

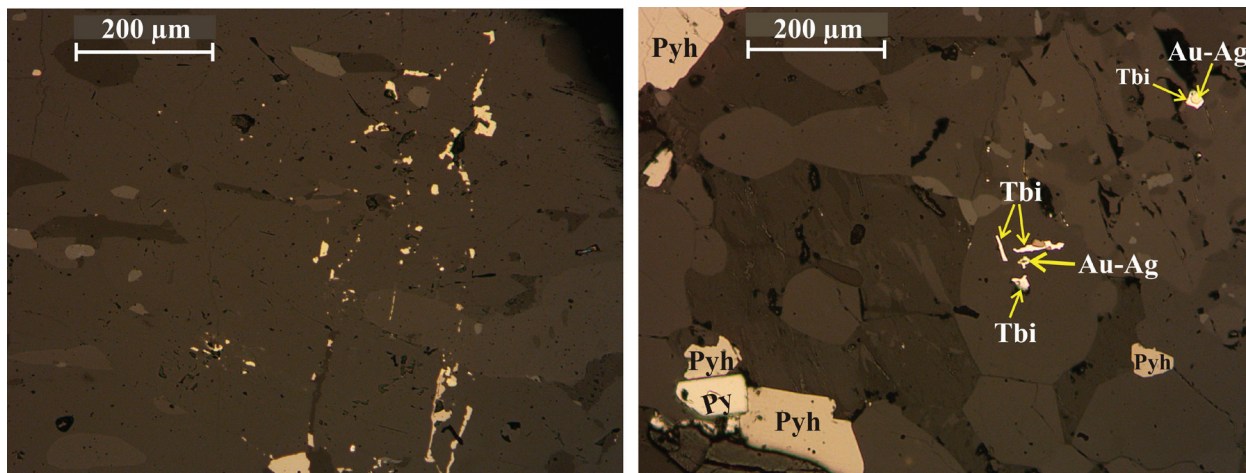


Рис. 5. Слева – цепочки зерен теллуридов, секущие сланцеватость породы; справа – скопление зерен висмутотеллуридов и самородного золота в измененных амфиболитах. Фото аншлифа, без анализатора.

Fig. 5. Left – a chain of telluride grains, cutting the rock schistosity. Right – a group of bismuth telluride and native gold grains in altered amphibolite. Polished section photos.

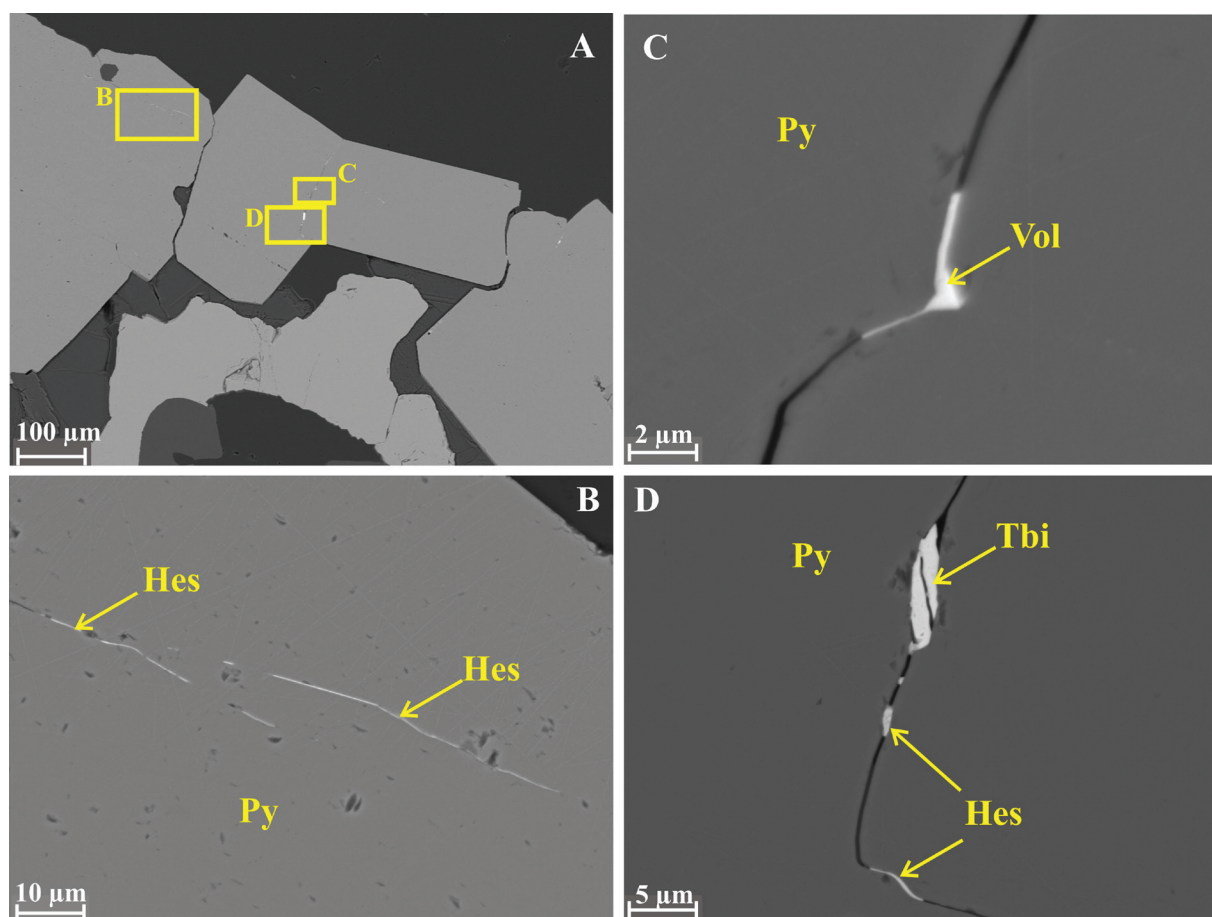


Рис. 6. Выделение теллуридов по трещинам в зернах пирита. Фотографии в обратно-рассеянных электронах.
Fig. 6. Tellurides in fissures in pyrite crystals. BSE images.

и ютенбогартит. Сульфиды висмута развиваются по галениту и самородному висмуту, сульфиды серебра и золота, в основном, образуют каймы по ранним сульфидам – пирротину, галениту (рис. 9).

Таблица 1. Химический состав теллуридов висмута, свинца и серебра, мас. %
Table 1. Chemical composition of bismuth, lead, and silver tellurides, mass. %

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fe	0.00	0.00	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.16	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Pb	0.00	0.00	1.56	н.п.о.	н.п.о.	0.25	1.41	н.п.о.	н.п.о.	61.60	61.92
Ag	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	6.45	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Bi	59.44	52.80	50.60	51.79	51.81	64.48	62.18	53.39	61.90	н.п.о.	н.п.о.
S	4.52	0.00	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Te	36.07	47.92	47.75	48.52	48.03	34.96	35.47	40.16	38.10	37.90	37.93
Сумма	100.03	100.72	99.91	100.31	99.84	99.86	99.05	100.00		99.50	99.85
Коэффициенты кристаллохимической формулы											
Fe	0.000	0.000				0.010					
Pb	0.000	0.000	0.060			0.004	0.023			1.000	1.003
Ag								0.190			
Bi	2.009	2.011	1.941	1.973	1.985	1.052	1.022	0.811	0.996		
S	0.995	0.000									
Te	1.996	2.989	2.999	3.027	3.015	0.934	0.955	0.999	1.004	1.000	0.998

Продолжение таблицы 1.

Элемент	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ni	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	13.51
Pb	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	5.81	н.п.о.	н.п.о.
Ag	19.09	18.44	61.13	62.42	62.51	62.79	9.16	21.06	15.93
Au	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Bi	35.47	35.61	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	38.39	25.00	н.п.о.
S	н.п.о.	н.п.о.	0.26	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Te	44.05	44.35	36.38	37.80	37.49	37.92	46.65	53.94	70.57
Сумма	98.62	98.39	97.76	100.21	100.00	100.71	100.01	100.00	100.01
Коэффициенты кристаллохимической формулы									
Ni									1.249
Pb							0.307		
Ag	1.023	0.993	1.977	1.984	1.991	1.986	0.929	1.847	0.801
Au									
Bi	0.981	0.989					2.010	1.132	
S			0.028						
Te	1.996	2.018	0.995	1.016	1.009	1.014	4.000	4.000	3.000

Примечание: 1 – тетрадимит, 2–5 – теллуrowисмутит, 6–9 – цумоит, 10–11 – алтаит, 12–13 – волинскит, 14–17 – гессит, 18 – фаза AgBi_2Te_4 , 19 – фаза Ag_2BiTe_4 , 20 – фаза NiAgTe_3 ; н.п.о. – содержание элемента ниже предела его обнаружения.

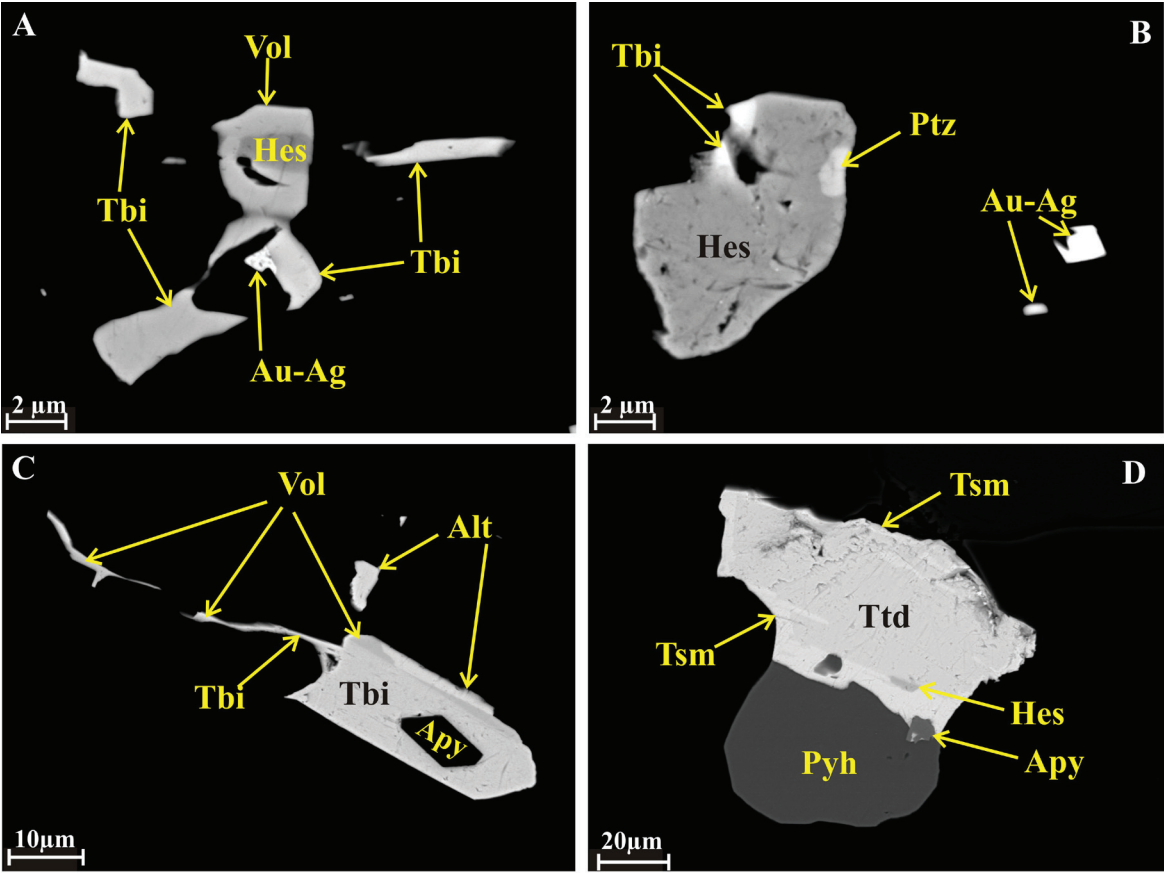


Рис. 7. Минеральные ассоциации теллуридов висмута, свинца и серебра.
Фотографии в обратно-рассеянных электронах.
Fig. 7. Mineral associations of bismuth, lead, and silver. BSE images.

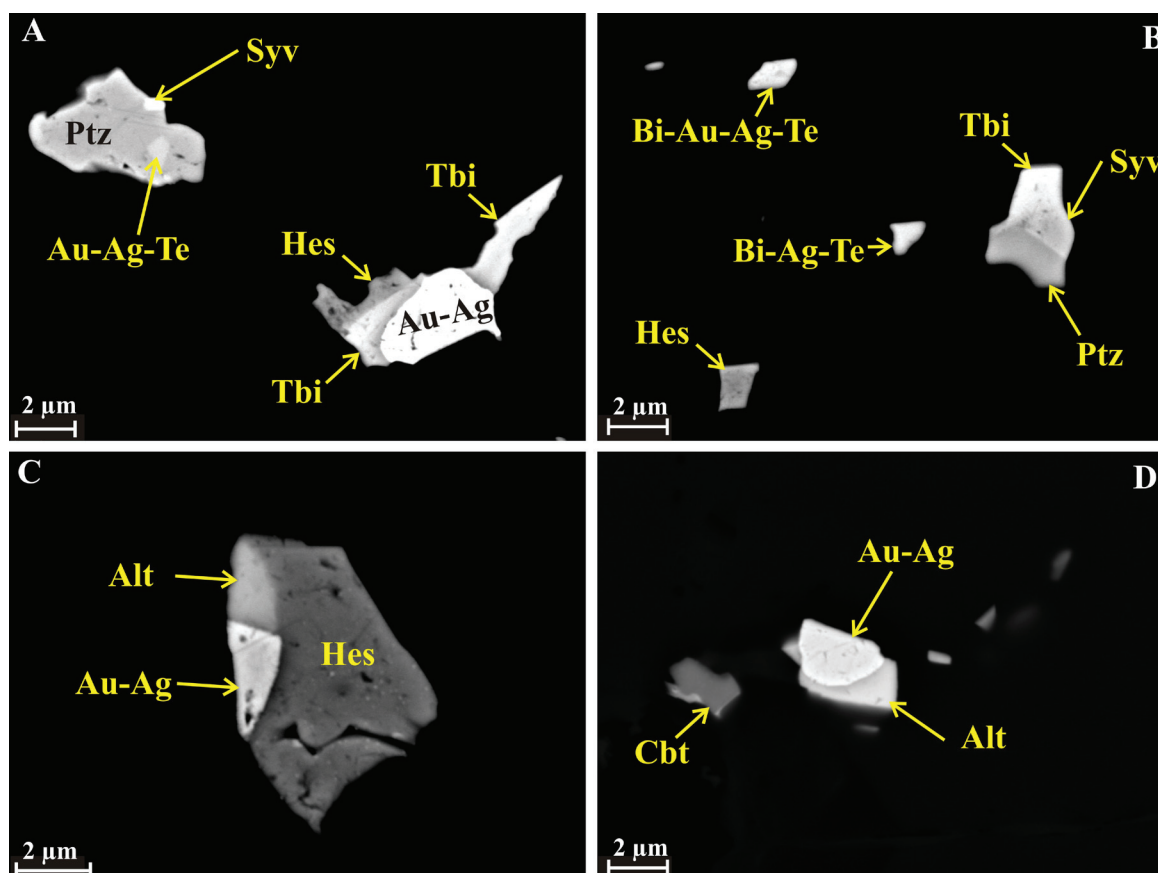


Рис. 8. Минералы золота в сростаниях с теллуридами висмута, свинца и серебра.

Фотографии в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 8. Gold minerals in associations with bismuth, lead, and silver tellurides. BSE images.

Среди минералов золота были диагностированы самородное золото в сплавах с серебром, теллуриды золота и серебра петцит и сильванит, а также фаза с соотношением Au, Ag, Te, отличным от известных теллуридов; кроме того, был выявлен сульфид серебра и золота ютенбогардит (рис. 8–10, табл. 2).

Самородное золото встречается в виде отдельных зерен и в сростаниях с теллуридами висмута, свинца и серебра (рис. 8 и 10). Форма зерен золота преимущественно изометричная, размер до 10 мкм. Золото средней пробы (700–800), что ниже, чем проба золота рудопроявления Средние Кичаны. Из элементов-примесей кроме серебра отмечено только железо (до 0.22 %).

Обсуждение результатов

Минерализация золота на рудопроявлении Верхние Кичаны отличается от таковой на Средних Кичанах по целому ряду признаков. В первую очередь, следует отметить различия в характере метасоматических преобразований вмещающих амфиболитов: на рудопроявлении Средние Кичаны минерализация связана с окварцованными амфиболитами и сопряженными с ними скарноидами, а на рудопроявлении Верхние Кичаны минерализация развивается в скаполит-диопсид-кварцевых с эпидотом и кальцитом метасоматитах по амфиболитам. Вполне возможно, что указанные отличия обусловлены составом флюидов при метасоматической переработке пород, а именно высоким содержанием летучих и высоким окислительным потенциалом флюидов на рудопроявлении Верхние Кичаны. О таких характеристиках флюидов говорит интенсивное развитие мейонита с сульфат-анионом. Интенсивная турмалинизация пород указывает на возможную связь метасоматических преобразований пород с малыми интрузиями турмалиновых гранитов предположительно палеопротерозойского возраста. Жильные тела турмалиновых гранитов вскрыты скважинами в 30–50 м ниже минерализованных пород.

Таблица 2. Химический состав минералов золота и серебра и сульфидов висмута, мас. %
Table 2. Chemical composition of gold and silver minerals and bismuth sulfides, mass. %

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pb	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	4.95
Ag	41.41	29.12	27.57	59.96	57.76	78.49	84.25	н.п.о.	29.93
Au	25.03	16.99	70.06	22.83	26.63	1.85	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Bi	н.п.о.	4.00	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	81.62	48.70
Sb	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	2.17	4.95	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
S	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	13.39	13.44	14.72	12.09	18.38	16.41
Te	33.42	49.89	н.п.о.	3.82	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Сумма	99.87	100.00	97.63	100.00	100.00	100.01	96.34	100.00	99.99
Коэффициенты кристаллохимической формулы									
Pb									0.093
Ag	2.980	2.071	0.418	3.726	3.833	1.585	2.072		1.084
Au	0.987	0.662	0.582	0.777	0.968	0.020			
Bi		0.147						2.044	0.911
Sb					0.128	0.089			
S				2.799	3.000	1.000	1.000	3.000	2.000
Te	2.033	3.000		0.201					

Примечание: 1 – петцит, 2 – фаза $Ag_2(Au,Bi)Te_3$, 3 – золото самородное, 4–5 – ютенбогардит, 6–7 – акантит, 8 – висмутин, 9 – матильдит; н.п.о. – содержание элемента ниже предела его обнаружения.

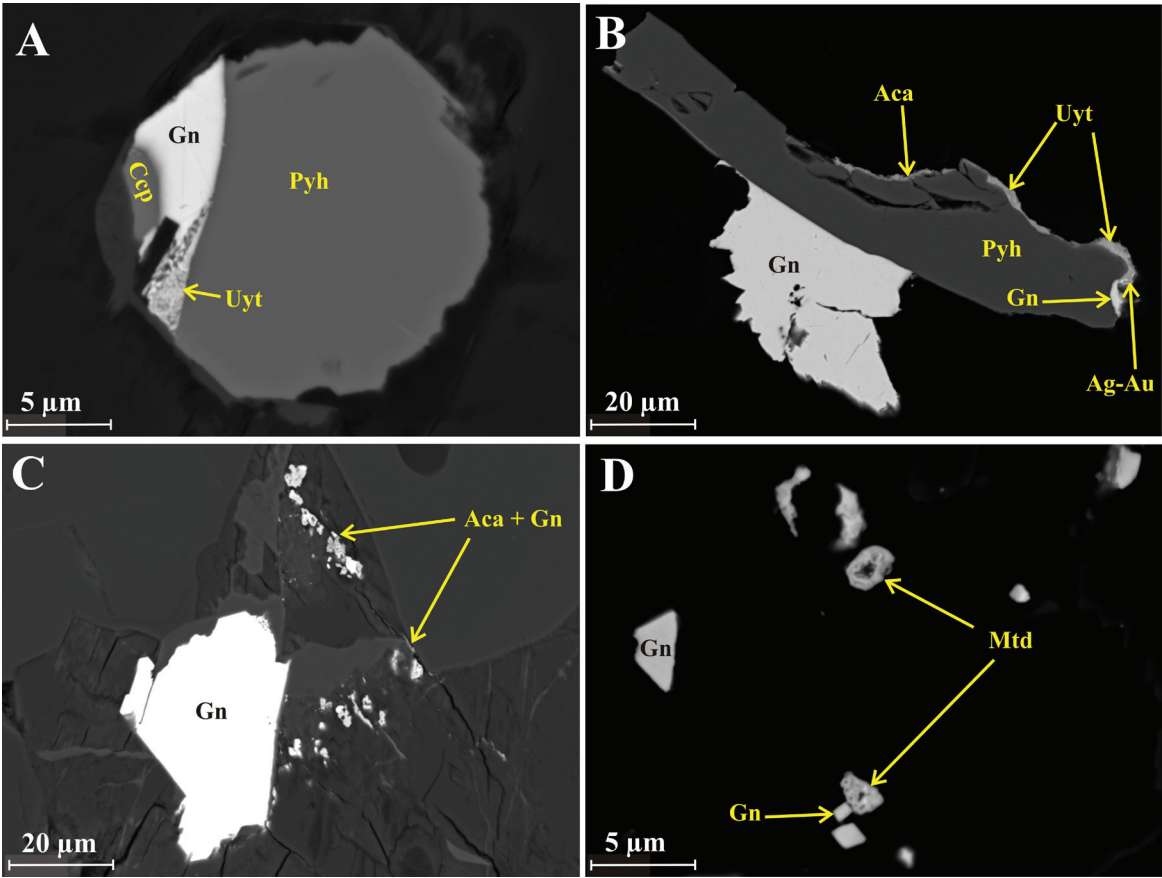


Рис. 9. Сульфиды золота, серебра и висмута в сростаниях с галенитом и пирротинитом.
Фотографии в обратно-рассеянных электронах.
Fig. 9. Gold, silver, and bismuth sulfides in association with pyrrhotite and galena. BSE images.

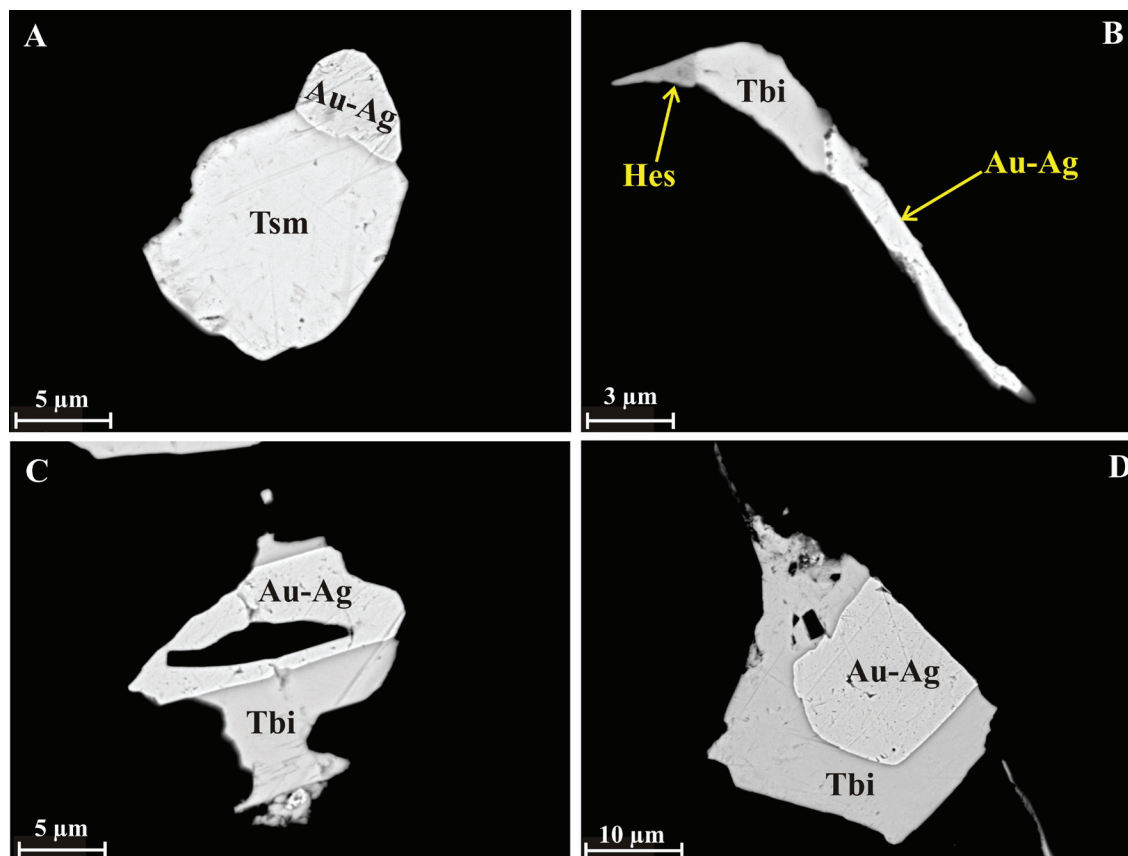


Рис. 10. Золото в сростаниях с теллуридами висмута. Фотографии в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 10. Native gold in association with bismuth tellurides. BSE images.

Различаются и геохимические ассоциации малых элементов проявлений Верхние и Средние Кичаны. На рудопроявлении Верхние Кичаны геохимическая ассоциация включает Au, Ag, Cu, Pb, As, Zn, а на Средних Кичанах это лишь Au и As (Калинин и др., 2017). Содержание мышьяка на Верхних Кичанах повышено незначительно – в 10 раз по отношению к среднему содержанию в земной коре, а не на три-четыре порядка, как на проявлении Средние Кичаны, и связан мышьяк преимущественно с пиритом, а не с арсенопиритом. Отношение Au/Ag в минерализованных породах проявления Верхние Кичаны низкое, меньше 0.1, а на Средних Кичанах отношение Au/Ag > 10.

Основные рудные минералы рудопроявления Верхние Кичаны – это пирит и пирротин, второстепенные – халькопирит, сфалерит, галенит, марказит, молибденит, теллуриды Bi, Ag, Au, Pb, самородный висмут и минералы ряда золото-серебро, тогда как на Средних Кичанах состав минерализации существенно проще: главные сульфиды – пирротин и арсенопирит, кроме того отмечены халькопирит, марказит, пентландит, самородное золото.

Судя по большой доле пирита среди сульфидов, формирование минерализации на проявлении Верхние Кичаны проходило после пика регионального метаморфизма палеопротерозойского этапа (верхняя часть амфиболитовой фации – $T = 575\text{--}630^\circ\text{C}$, $P = 5\text{--}6.5$ кбар) (Беляев, Пожиленко, 1997; Ранний ..., 2005) на фоне снижающейся температуры, ниже температуры перехода пирит – пирротин, то есть ниже $\sim 500^\circ\text{C}$ (Tomkins, 2010). Минерализация теллуридов висмута и золота развивалась позже, чем пирит-пирротиновая минерализация, поскольку эта минерализация контролируется микротрещинами, секущими сланцеватость пород, и отмечено развитие теллуридов по трещинам в пирите.

Два рудопроявления золота – Средние и Верхние Кичаны, контролирующиеся единой зоной надвиговой тектоники, различаются по характеру изменения вмещающих амфиболитов и гнейсов, геохимическим особенностям оруденелых пород, составу рудной минерализации. Такие различия могут быть обусловлены разным генетическим типом минерализации золота. Характеристики

рудопроявления Средние Кичаны отвечают орогеническим месторождениям в глубоко метаморфизованных комплексах (Калинин, 2018), тогда как минерализация рудопроявления Верхние Кичаны ближе всего к генетическому типу объектов, связанных с интрузиями. В роли интрузивных образований, обусловивших формирование золото-теллуридной минерализации, судя по интенсивной турмалинизации минерализованных пород, выступили малые интрузии турмалиновых гранитов, вскрытые в районе рудопроявления буровыми скважинами. Связь золота с турмалиновыми гранитами может послужить важными поисковым признаком минерализации в Тикшеозерском поясе.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0004.

Литература

1. Беляев О. А., Пожиленко В. И. Структурно-метаморфическая эволюция Беломорского подвижного пояса (Енский сегмент) // Беломорский мобильный пояс: геология, геодинамика, геохронология. Тезисы докладов. Петрозаводск. 1997. С. 17.
2. Калинин А. А. Золото в метаморфических комплексах северо-восточной части Фенноскандинавского щита. Апатиты. Изд-во: ФИЦ КНЦ РАН, 2018. 279 с. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-378-8>.
3. Калинин А. А., Астафьев Б. Ю., Воинова О. А., Баянова Т. Б., Хиллер В. В. Геологическое строение и перспективы рудоносности Кичанской структуры Тикшеозерского зеленокаменного пояса (Северная Карелия) // Литосфера. 2017. Т. 17. №3. С. 102–126.
4. Ранний докембрий Балтийского щита / Ред. Глебовицкий В. А. СПб. Изд-во: Наука, 2005. 711 С.
5. Tomkins A. G. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis // *Geochim Cosmochim Acta*. 2010. V. 74. P. 246–259. DOI: 10.1016/j.gca.2010.03.003.
6. Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85. P. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.