

**Ni-Co АРСЕНИДЫ И Ag-Bi ТЕЛЛУРИДЫ В В-Pb-Zn СКАРНАХ ПАРТИЗАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ДАЛЬНЕГОРСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, СИХОТЭ-АЛИНЬ, РОССИЯ)****Л.Ф. Симаненко, В.В. Раткин, В.А. Пахомова, О.А. Елисеева***ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022; e-mail: ludmilasimanenko@yandex.ru; ratkin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 8 февраля 2023 г.

При минералого-геохимическом исследовании северо-восточного фланга Партизанского месторождения в зоне его совмещения с Дальнегорским боросиликатным месторождением в типовой Pb-Zn руде выявлена наложенная Ni-Co арсенидная и Ag-Bi теллуридная минерализация. Изучены типоморфизм арсенидов и теллуридов, последовательность и физико-химические условия их образования. Раммельсбергит и гессит описаны на месторождении впервые. Представляется, что арсенидная и теллуридная ассоциации сформированы после завершения главного скарново-сульфидного этапа рудообразования. Вкупе с более ранними находками в этой же зоне сочленения крупных самородков Bi, почковидных агрегатов самородных As и Sb арсенидно-теллуридную минерализацию можно отнести к геохимически единому Ag-Bi-Ni-Co-As(Sb) минеральному комплексу, отвечающему в миниатюре по своим геохимическим особенностям рудам пятиэлементной рудной формации.

**Ключевые слова:** В-Pb-Zn скарны, никелин, раммельсбергит, скуттерудит, хедлейит, гессит, висмут самородный, пятиэлементная формация, Дальнегорск, Сихотэ-Алинь.

**ВВЕДЕНИЕ**

В скарновых Pb-Zn месторождениях Дальнегорского района Ni-Co арсениды и Ag-Bi теллуриды известны лишь как единичные акцессорные находки. Так, Ag-Bi теллуриды (хедлейит, селеножозеит А) обнаружены в виде единичных микровключений в Ag-Bi-носном галените прикорневой зоны Больничной рудной залежи Партизанского месторождения [20]. Ni-Co арсениды в виде акцессорной вкрапленности были установлены на Садовом [2] и Николаевском [9] месторождениях. На Дальнегорском месторождении в разные годы на площади борного карьера также имели место спорадические находки минералов никеля и кобальта [12, 15]. Сульфидная минерализация, проявленная в поздних боросиликатных скарнах, аналогична в минералого-геохимическом отношении рудам корневых частей скарново-полиметаллических тел Партизанского месторождения. Предполагалось, что упомянутая акцессорная вкрапленность Ni-Co минералов является составной частью сульфидных руд скарново-полиметаллического этапа формирования перечисленных месторождений.

Наиболее интересным и представительным местом в плане необычных минералогических находок

является зона сочленения северо-восточного фланга Партизанского месторождения с верхними горизонтами Западного блока борного карьера (гор.  $\approx +400$  м). Здесь в массиве кварц-датолит-андрадитовых скарнов располагается зона довольно многочисленных разнообразных палеогидротермальных карстовых полостей и каверн, которые зачастую характеризуются «экзотическим» минеральным выполнением. Так в 90-х годах прошлого века в одной из полостей был обнаружен уникальный (весом более 17 кг) самородок висмута с включениями графита и закапсулированных в металлическом матриксе жидких углеводородов [14]. В другой палеогидротермальной полости авторами были выявлены и детально изучены концентрически зональные почковидные агрегаты самородного мышьяка и стибарсена, ассоциированные с друзовидным кварцем [18]. На расстоянии 0.2–0.5 м от полости с самородным мышьяком располагалась группа более мелких каверн, выполненных кварц-кальцитовым агрегатом с прожилковидными выделениями самородной сурьмы и стибарсена. В отдельных кавернах в парагенезисе с As-Sb интерметаллидом наблюдалась мелкая вкрапленность леллингита, антимонита, марказита и пираргирита. Несмотря на проведенное

минералогическое исследование вышеперечисленных минеральных образований, вопросы их соотношения с галенит-сфалеритовыми рудами Партизанского месторождения в силу пространственной разобщенности оставались нерешенными.

Настоящая работа представляет результаты детального исследования рудно-минерализованных штупфов кварц-андрадит-датолитового скарна, отобранных в ходе текущих ревизионных работ на участке распространения мелких палеогидротермальных каверн. Специфической особенностью изученных рудных агрегатов явилось то, что они представляют собой пространственно совмещенные разнотипные (разнометалльные) минеральные ассоциации – Pb-Zn сульфидную, Ni-Co арсенидную и Ag-Bi теллуридную. Проведенные минералогические исследования, включая химизм всех минералов, последовательность кристаллизации и оценку физико-химических параметров среды их формирования, вкуче с предшествующими исследованиями [14, 18] и материалами авторского доизучения интерметаллидов и самородных минералов из палеогидротермальных полостей позволило выявить соотношение Ni-Co арсенидной и Ag-Bi теллуридной ассоциаций с сульфидной Pb-Zn рудой и сделать предположение о возможном совмещении различных генетических типов оруденения на локальном участке Партизанского месторождения.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРТИЗАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Дальнегорский рудный район находится на юго-востоке Сихотэ-Алинского орогенного пояса и приурочен к Таухинскому террейну – фрагменту раннемеловой аккреционной призмы. Террейн сложен тектоно-стратиграфической последовательностью, включающей триасово-юрские кремнистые, кремнисто-глинистые породы и раннемеловые берриас-валанжинские кварц-полевошпатовые песчаники и алевриты [8]. Особенностью рудовмещающего «таухинского» разреза в Дальнегорском районе является присутствие пачек микститов мощностью от 500 до 1000 метров с характерными многочисленными олистолитами и олистоплаками средне-верхнетриасовых известняков. Цемент олистостром представлен, как и в целом матрикс аккреционной призмы, берриас-валанжинскими кварц-полевошпатовыми аркозовыми песчаниками.

В центре района обнажается складчатый комплекс аккреционной призмы с толщей олистостромовых отложений, которая в обратной тектоно-стратиграфической последовательности подстилается раннемеловыми флишоидами и перекрыта триасово-

юрскими кремнисто-глинистыми породами с горизонтами фтанитов.

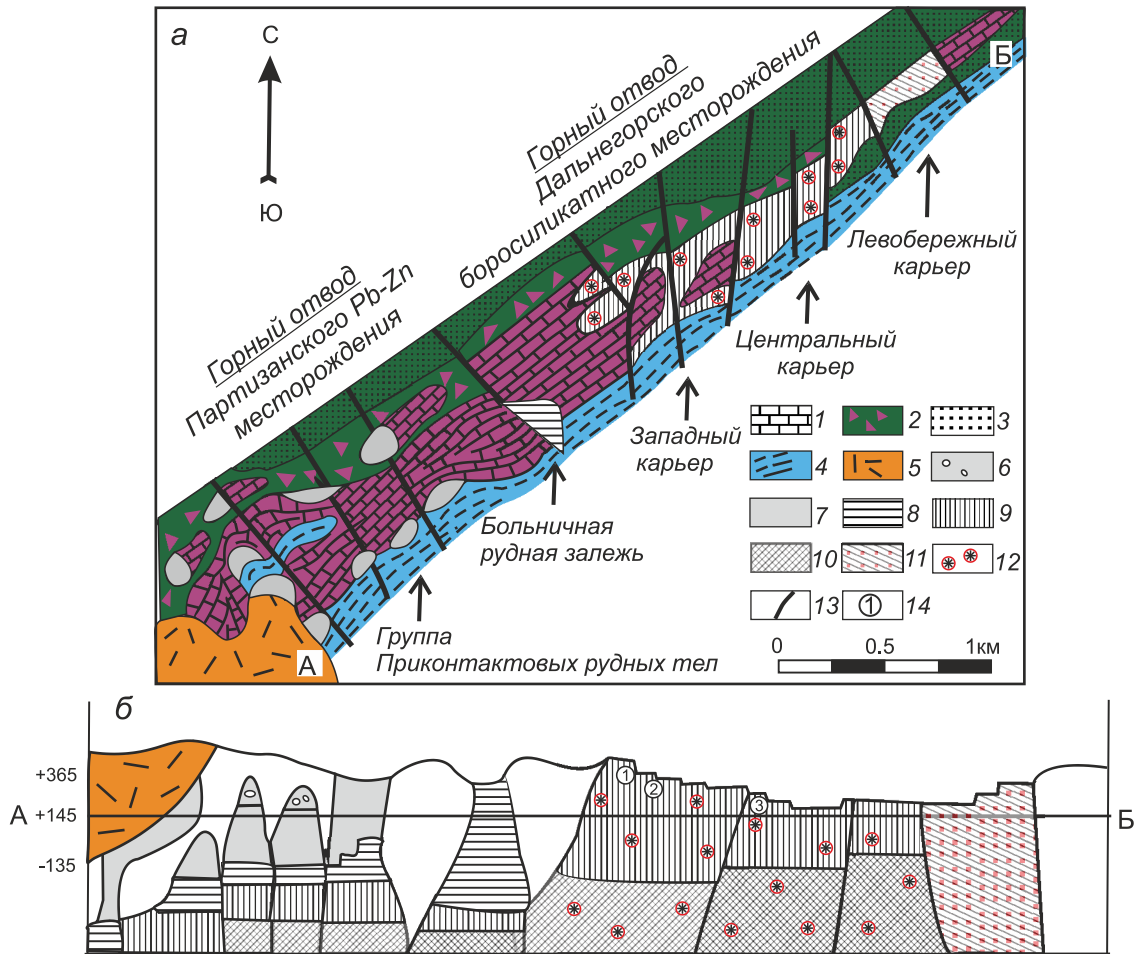
В районе доминируют инфильтрационные известковые скарны с Pb-Zn и борным оруденением [6, 22]. Тела скарнов пространственно сопряжены с олистостромовой толщей: олистолитами известняков триасового возраста. Геологические данные [7] и современные изотопно-геохимические исследования [24] указывают на связь скарнового рудообразования с палеоценовыми гранитоидами.

Структурно Партизанское месторождение представлено как гигантский олистолит – фрагмент частично дезинтегрированного, стоящего на голове пластового тела триасовых известняков протяженностью около 5 км (рис. 1). Трубообразные зоны скарнирования локализуются преимущественно на участках пересечения контактов олистолита с СЗ разломами.

Но на северо-восточном фланге месторождения располагается гигантская, объемом около 1 км<sup>3</sup>, зона, где фрагментированное тело известняков на 80 % превращено в скарны. В этой зоне, кроме глыб гидротермально переработанных известняков, присутствуют фрагменты тектонизированных фтанитов и кремнистых пород триасового возраста [1].

Скарнирование на северо-восточном фланге Партизанского месторождения проявилось дважды. Палеоценовая, около 57 млн лет, по данным Ar-Ag датирования [13], зона скарнирования пространственно совмещена с ранними бороносными гроссуляр-волластонитовыми скарнами с данбуридом, сформированными в кампанское время [16, 17]. В ходе скарново-гидротермальной переработки ранние скарновые боросиликаты были переотложены. Как результат, поздние (палеоценовые) скарны были обогащены в промышленных масштабах датолитом и аксинитом и в текущее время обрабатываются карьером как боросиликатное сырье.

Минералогия скарнов и сульфидных руд Партизанского месторождения при абсолютном доминировании галенита и сфалерита стандартна. В объеме рудных тел проявлена типовая, характерная для всех Pb-Zn месторождений Дальнегорского района, закономерная изменчивость состава силикатных и рудных минералов. Вертикальная зональность скарново-гидротермальных рудных тел месторождения, детально описанная в работах [19, 20], приведена на рис. 1. Северо-восточный фланг месторождения отвечает корневой части гидротермально-метасоматической колонны и представлен (ильваит)-геденбергит-андрадитовыми и андрадитовыми скарнами с датолитом, непродуктивными в отношении свинцово-цинкового оруденения. Бедная сульфидная минерализация,



**Рис. 1.** Совмещенный генерализованный геологический план горизонта «+145 м» Партизанского В-Pb-Zn месторождения (а) и проекция скарново-рудных тел в вертикальной плоскости по линии А-Б (б), на основе графических материалов ГХК «Бор» и ГМК «Дальполиметалл».

1 – триасовые известняки; 2 – раннемеловые микститы с обломками известняков, песчаников и кремнисто-глинистых пород; 3 – раннемеловые аркозовые песчаники матрикса аккреционной призмы; 4 – триасово-юрские кремнисто-глинистые породы с горизонтами фтанитов; 5 – поздний мел-раннепалеоценовые вулканиты кислого состава; 6–10 – скарны и рудные тела палеоценового возраста: 6 – свинцово-цинковые руды ( $Pb/Zn > 1$ ) в кварц-кальцитовой породе, 7 – свинцово-цинковые руды ( $Pb/Zn \approx 0.8$ ) в мангангеденбергитовых скарнах, 8 – существенно цинковые руды ( $Pb/Zn < 0.5$ ) с Ag-Vi-носным галенитом в ильваит-андрадит-геденбергитовых скарнах, 9 – ильваит-геденбергит-андрадитовые скарны корневой зоны с сульфидными гнездами, Ag-Vi-носный, галенит-сфалеритового состава; 10 – безрудные андрадитовые скарны корневой зоны; 11 – ранние гроссуляр-волластонитовые скарны кампанского возраста с данбурином; 12 – зона перетложения ранних боросиликатных руд в виде скарнов с обильным датолитом и аксинитом; 13 – малоамплитудные сбросы; 14 – места отбора каменного материала с самородным мышьяком и стибарсеном (1), Co-Ni арсенидами и Ag-Vi теллуридами (2) и самородками висмута (3).

вскрытая здесь западным карьером Дальнегорского месторождения, представлена в основном гнездовидными обособлениями низкожелезистого сфалерита, Ag-Vi-носного галенита и присутствующими в их матриксе микровключениями парагенных второстепенных и редких минералов [20].

Кроме скарнов в восточной части карьера в тектонизированной зоне контакта известняков и толщи триасово-юрских кремнисто-глинистых пород с фтанитами (часто фиксируемой как Восточно-Партизан-

ский разлом) присутствуют ореолы графитизированных пород, так называемые углеродистые метасоматиты [21]. По данным наблюдения и изотопно-геохимических исследований [1, 5], эти ореолы непосредственно сопряжены с фрагментами линзовидных тел динамотермально преобразованных триасово-юрских фтанитов. При насыщенности битумами и содержаниях  $C_{орг}$  от 0.2 до 7.7 % графитизированные фтаниты геохимически аномально обогащены рудными элементами, включая V, Mo, Ag, Au, Co, Ni, Sb и As.

Доминирующие содержания As отвечают, согласно данным [1, 21] (Алексеев и др., 2007; Томсон и др., 1993), интервалу от 120 до 600 г/т. Для фтанитов характерна тонкая вкрапленность мышьяковистого пирита. Присутствуют Ni сульфоарсениды и Co арсениды, герсдорфит и скуттерудит [21]. На микроуровне фиксируются включения самородных железа, цинка, алюминия и других металлов. Е.Ю. Буслаева [4] диагностировала в составе битумоидов, экстрагируемых из фтанитов, элементоорганические соединения, включая соединения мышьяка в форме  $C_5H_{11}AsO_2$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ СРАСТАНИЙ Pb-Zn СУЛЬФИДОВ, Co-Ni АРСЕНИДОВ И Ag-Bi ТЕЛЛУРИДОВ

Изучение полиминеральных парагенезисов из рудных гнездовидных скоплений, обнаруженных на участке распространения мелких кавернозных полостей в западном карьере боросиликатных руд (гор.+400 м), проводилось на базе поляризационного микроскопа AxioPlan 2 (Zeiss). Химический состав минералов определялся в ДВГИ ДВО РАН на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 (JEOL, Япония), оснащенный энергодисперсионной системой Inca Energy 400 (Oxford Instruments, Великобритания) с использованием стандартных методик и эталонов. Результаты анализов минералов представлены в таблицах 1–3.

На основании изучения структурно-текстурных особенностей и состава рудных агрегатов выделяются следующие, сменяющие друг друга во времени минеральные ассоциации: (1) сульфидная сфалерит-галенитовая; (2) арсенидная никелин-раммельсбергит-скуттерудитовая; (3) теллуридная серебро-висмутотная. Описание минеральных ассоциаций приводится ниже.

**Сульфидная сфалерит-галенитовая минеральная ассоциация** является наиболее ранней и наиболее развитой среди изученных рудных агрегатов на данном участке борного карьера. Главными минералами ассоциации являются сфалерит и галенит. В качестве второстепенных и редких минералов в составе ассоциации в незначительном количестве присутствуют блеклая руда, самородные висмут и золото. Минеральные агрегаты сфалерит-галенитовой ассоциации встречаются как прожилковидные выделения, приуроченные к трещинкам в кварцевом матриксе (рис. 2, а), и в виде интерстициальных выполнений (размером от 0.5 мм до первых см) в промежутках между зернами граната, датолита и кварца (рис. 2, б).

Границы контакта зерен сфалерита и галенита обычно плавные, без признаков коррозии. Обнаруженные в ряде случаев заливообразные формы гале-

нита в сфалерите указывают, что отложение сфалерита началось раньше, но затем эти сульфиды кристаллизовались вместе (рис. 2, в, з). Часто галенит и сфалерит образуют тесные прорастания с минералами более поздних рудных ассоциаций.

Блеклая руда (тетраэдрит) по отношению к главным сульфидам является более поздней, локализуясь в межзерновых промежутках на стыке зерен галенита и сфалерита (рис. 2, з). В силу того, что висмут самородный в изученных образцах зафиксирован в различных парагенезисах, выделяется две его генерации. В составе описываемой галенит-сфалеритовой ассоциации присутствует висмут I, который образует как мельчайшие включения (сотые доли мм) в матриксе сфалерита и галенита, так и самостоятельные зерна (до 1 мм в поперечнике), пространственно приуроченные к сфалерит-галенитовым агрегатам (рис. 2, б; рис. 3). Золото самородное отмечено в единичных случаях. Характер срастания его тончайших зерен с минералами галенит-сфалеритовой ассоциации иллюстрирует рис. 3.

Составы минералов галенит-сфалеритовой ассоциации приведены в таблице 1.

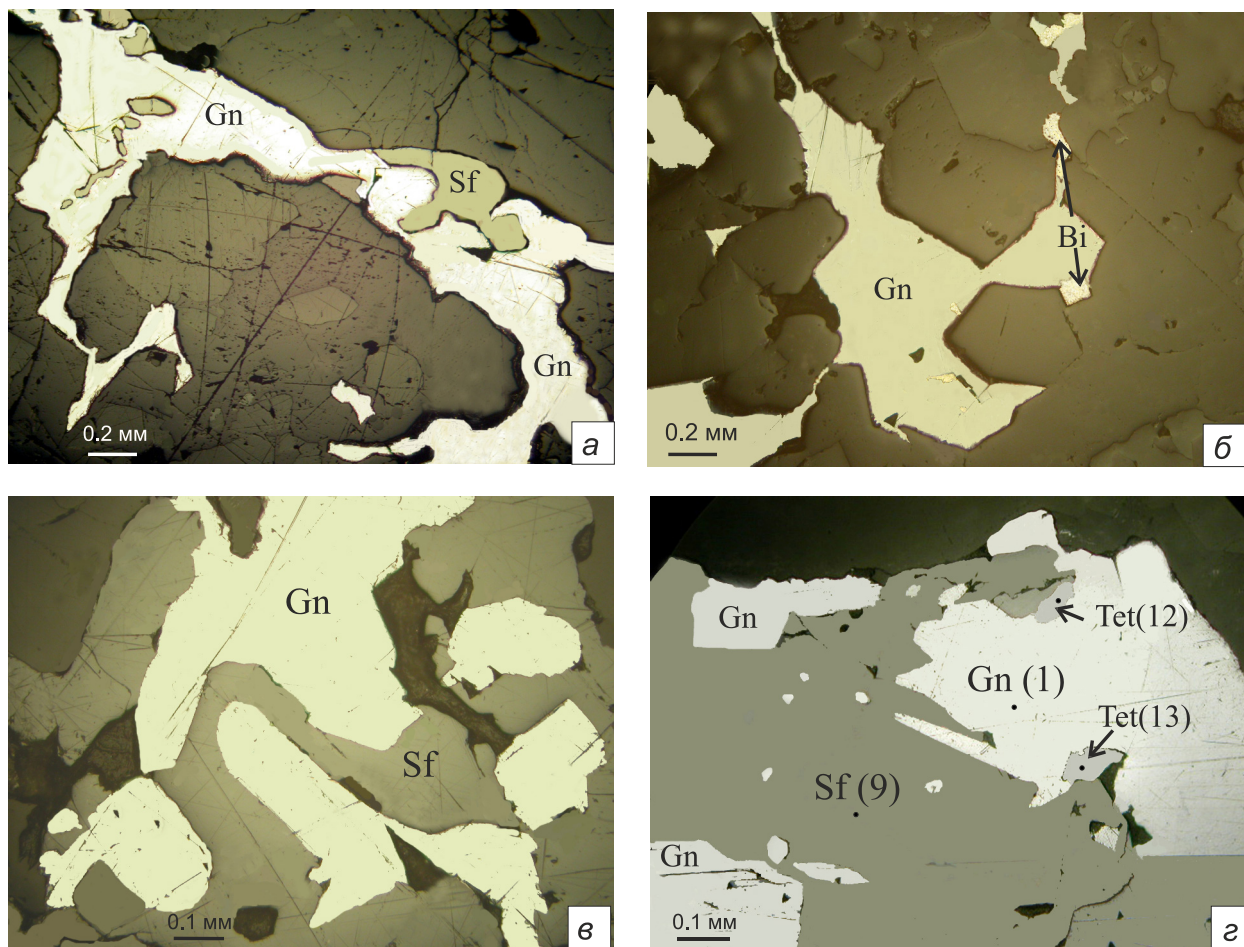
Характерной особенностью галенитов является постоянное присутствие в нем примесей серебра и висмута. По уровню концентрации серебра галениты характеризуются довольно узким разбросом значений (0.13–0.35 мас. %). Для висмута диапазон содержания значительно шире (0.10–1.43 мас. %). Отношение Bi/Ag варьирует в интервале 1.24–2.96, что предполагает вхождение висмута и серебра в решетку галенита в форме как  $\alpha$ -матильдита ( $\alpha$ -AgBiS<sub>2</sub>), так и сложного двойного твердого раствора матильдит-беегеритового типа (по схемам  $2Pb^{2+} \leftarrow Ag^+ + Bi^{3+}$  и  $3Pb^{2+} \leftarrow 2Bi^{3+}$ ) [19]. Кроме примесей серебра и висмута в галените часто фиксируются примеси селена (0.13–0.50 мас. %) и теллура (0.10–0.17 мас. %), изоморфно замещающие серу (табл. 1).

Сфалерит представлен клейофаном с типовой низкой железистостью (1.10–1.5 мас. %) и незначительной примесью кадмия (0.27–0.38 мас. %).

Блеклые руды имеют низкие содержания серебра (1.15–1.35 мас. %) при практически полном отсутствии теннантитовой составляющей (примесь мышьяка составляет 0.70–0.78 мас. %) и практически равновеликих содержаниях железа (3.10–3.13 мас. %) и цинка (3.74–4.11 мас. %).

В висмуте I присутствует примесь золота (0.14–0.15 мас. %). А в золоте, отвечающем по составу электрону, при содержаниях серебра 43.30–47.56 мас. %, отмечается заметная примесь висмута (0.20–0.51 мас. %).





**Рис. 2.** Характерные микротекстуры рудных агрегатов сульфидной галенит-сфалеритовой ассоциации.

*a, б* – прожилковидная (*a*) и интерстициальная (*б*) формы выделений сульфидов в кварце; формы выделения самородного висмута в ранней ассоциации (*б*); *в* – «заливообразный» характер срастания сфалерита и галенита; *г* – микровыделения тетраэдрита, приуроченные к контакту зерен сфалерита и галенита. Буквенные обозначения минералов для рисунков 2–5: As – самородный мышьяк, Au – электрум, Bi – самородный висмут, Cal – кальцит, Cbt – кобальтин, Gn – галенит, Hdl – хедлейит, Hes – гессит, Nc – никелин, Qtz – кварц, Rmb – раммельсбергит, Sb – сурьма самородная, SbAs – стибарсен, Sct – скуттерудит, Sf – сфалерит, Tet – тетраэдрит.

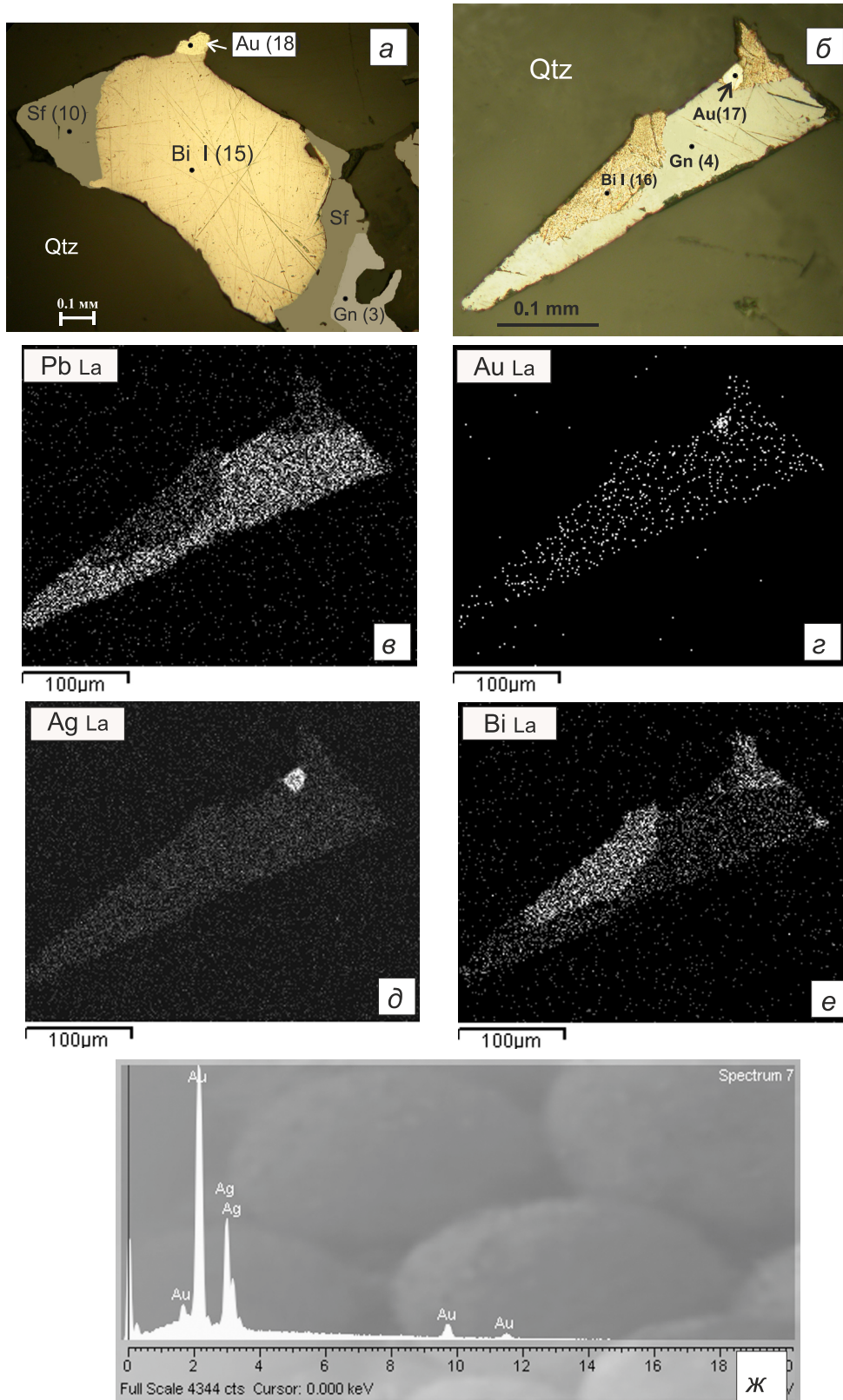
Примечательно, что охарактеризованная галенит-сфалеритовая ассоциация, как по минеральному составу, так и по химизму главных и второстепенных минералов, является практически полным аналогом скарново-полиметаллической руды корневой зоны Партизанского месторождения.

#### **Арсенидная никелин-раммельсбергит-скуттерудитовая ассоциация**

В изученных агрегатах ассоциация представлена в порядке распространенности минералов никелином, скуттерудитом и раммельсбергитом. В единичном случае, в одном из сростков арсенидных минералов, установлен кобальтин, образующий микровключения внутри зерна никелина. Характеризуемая арсенидная ассоциация обнаруживает отчетливые признаки более поздней кристаллизации относительно сульфидной.

В участках пространственного совмещения минеральных ассоциаций галенит-сфалеритовые агрегаты обрастаются и/или частично замещаются более поздними арсенидными минералами (рис. 4, *в, д*). Кроме того, для никелина характерно развитие метакристаллов как в галените, так и в силикатном матрикс с цепочечным расположением кристаллов вдоль трещинок в породе (рис. 4, *а, б*).

Во многих случаях агрегаты арсенидных минералов зональны (рис. 4, *б, г, е*). Изучение взаимоотношения минералов в зональных сростках дает основание установить последовательность отложения арсенидного парагенезиса. Наиболее ранним минералом является никелин (моноарсенид никеля), который обрастается последовательно каймами раммельсбергита (диарсенида никеля) и более позднего скуттерудита (триарсенида кобальта).



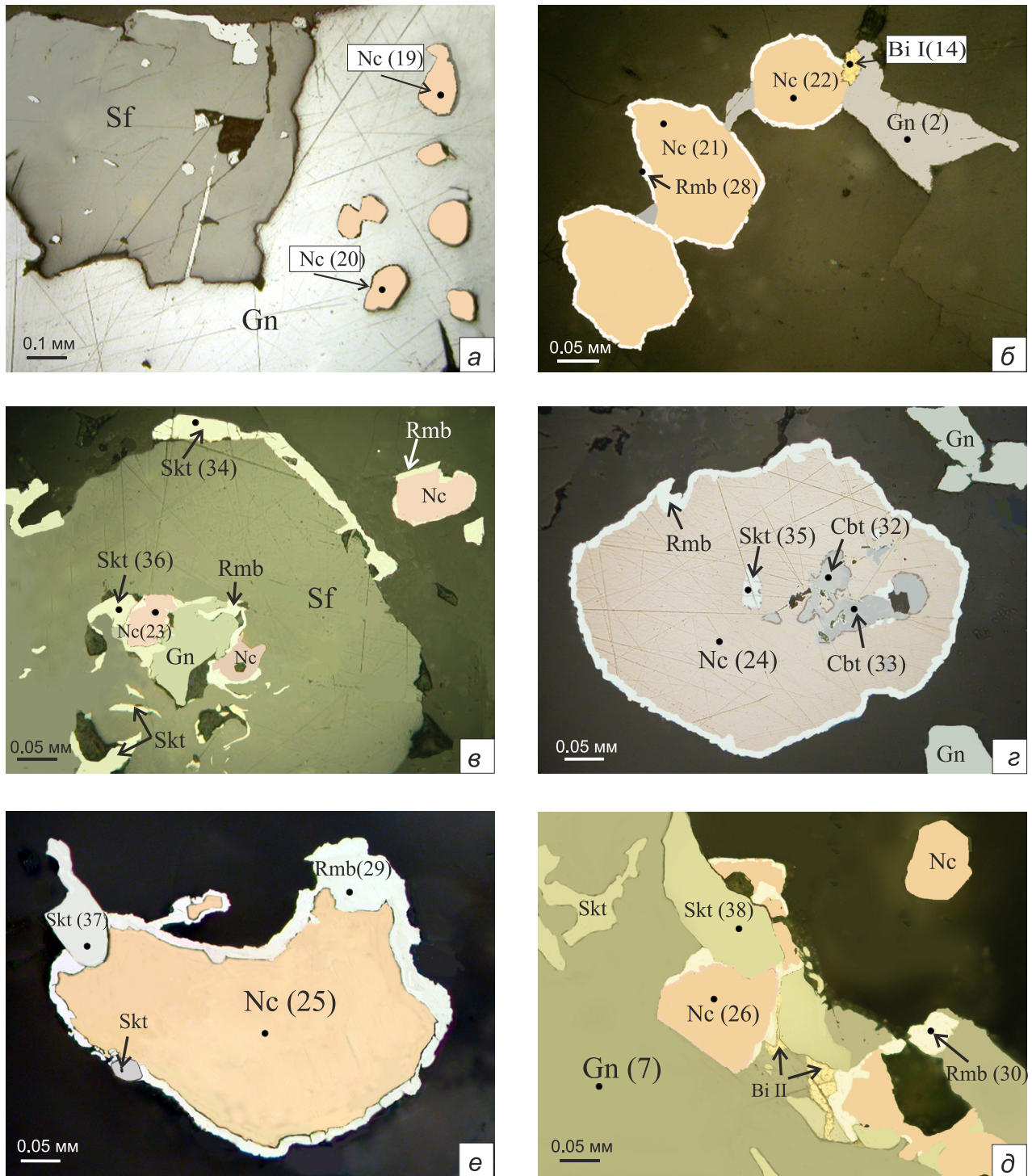
**Рис. 3.** Характер срастания золота и самородного висмута I с главными сульфидами галенит-сфалеритовой ассоциации. *a* – снимок в отраженном свете под микроскопом. Темный матрикс – кварц; *б-е* – электронно-микронзондовые снимки золота и висмута I: *б* – в отраженных электронах; *в* – в рентгеновских лучах  $Pb L_{\alpha 1}$ ; *г* –  $Au L_{\alpha 1}$ ; *д* –  $Ag L_{\alpha 1}$ ; *е* –  $Bi L_{\alpha 1}$ ; *ж* – энергодисперсионный рентгеновский спектр золота в данном срезе. Au – электрум, Bi – самородный висмут, Gn – галенит, Qtz – кварц, Sf – сфалерит.

Таблица 1. Состав минералов сульфидной галенит-сфалеритовой ассоциации по данным электронно-зондового анализа (мас. %).

№ анализа	№ обр.	Минерал	Au	Ag	Bi	Pb	Zn	Cu	Fe	Cd	As	Sb	S	Se	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	674/5		-	0.13	0.10	83.70	-	-	-	-	-	-	12.80	0.19	0.10	97.08	Pb <sub>1.00</sub> S <sub>0.99</sub>
2	674/5-1		-	0.28	0.70	85.13	-	-	-	-	-	-	13.61	0.13	0.10	100.06	(Pb <sub>0.97</sub> Ag <sub>0.01</sub> Bi <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> S <sub>1.00</sub>
3	674/5-5		-	-	0.80	85.64	0.20	-	-	-	-	-	13.70	0.50	-	100.84	(Pb <sub>0.97</sub> Bi <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (S <sub>1.00</sub> Se <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub>
4	674/5-4	Галенит	-	0.24	1.14	84.36	-	-	-	-	-	-	13.48	0.20	0.15	99.57	(Pb <sub>0.97</sub> Bi <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> S <sub>1.00</sub>
5	674/5-3		-	0.25	1.43	84.45	0.11	-	-	-	-	-	13.25	0.26	-	99.78	(Pb <sub>0.98</sub> Bi <sub>0.02</sub> ) <sub>1.00</sub> (S <sub>0.99</sub> Se <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub>
6			-	0.35	1.40	84.12	-	-	-	-	-	-	13.59	-	0.17	99.79	(Pb <sub>0.97</sub> Ag <sub>0.01</sub> Bi <sub>0.02</sub> ) <sub>1.00</sub> S <sub>1.01</sub>
7	674/5-2		-	0.27	0.77	86.46	-	-	-	-	-	-	13.03	-	0.12	100.65	(Pb <sub>1.01</sub> Ag <sub>0.01</sub> Bi <sub>0.01</sub> ) <sub>1.03</sub> S <sub>0.98</sub>
8			-	0.15	0.72	86.58	-	-	-	-	-	-	13.55	-	0.14	101.14	(Pb <sub>0.99</sub> Bi <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> S <sub>1.00</sub>
9	674/5	Сфалерит	-	-	-	-	65.33	-	1.32	0.27	-	-	32.10	-	-	99.02	(Zn <sub>0.99</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>1.01</sub> S <sub>0.99</sub>
10	674/5-5		-	-	-	-	64.56	-	1.50	0.38	-	-	32.81	-	-	99.25	(Zn <sub>0.97</sub> Fe <sub>0.03</sub> ) <sub>1.00</sub> S <sub>1.00</sub>
11	674/5-2		-	-	-	-	66.36	-	1.10	0.30	-	-	32.82	-	-	100.58	(Zn <sub>0.98</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>1.00</sub> S <sub>0.99</sub>
12		Тетраэдрит	-	1.15	-	-	4.11	37.05	3.10	-	0.70	28.39	25.00	-	-	99.50	(Cu <sub>0.75</sub> Ag <sub>0.18</sub> ) <sub>9.93</sub> (Zn <sub>1.05</sub> Fe <sub>0.93</sub> ) <sub>1.98</sub> (Sb <sub>3.90</sub> As <sub>0.16</sub> ) <sub>4.06</sub> S <sub>13.04</sub>
13	674/5		-	1.35	-	-	3.74	37.38	3.13	-	0.78	28.56	25.10	-	-	100.04	(Cu <sub>0.79</sub> Ag <sub>0.21</sub> ) <sub>10.00</sub> (Zn <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.93</sub> ) <sub>1.88</sub> (Sb <sub>3.90</sub> As <sub>0.17</sub> ) <sub>4.07</sub> S <sub>13.04</sub>
14	674/5-1		-	-	99.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.64	
15	674/5-5	Висмут I	0.14	-	99.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.49	
16	674/5-4		0.15	-	99.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.54	
17	674/5-5	Золото	51.76	47.56	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.83	
18	674/5-4	(электрум)	55.75	43.30	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.25	

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе «JXA-8100» (ДВГИ, аналитик Г.Б. Молчанова). Прочерк – не обнаружено.





**Рис. 4.** Соотношение минералов сульфидной и арсенидной ассоциаций.

*a, б* – метакристаллы никелина в галените (*a*) и кварце (*б*); *в* – замещение минералов сульфидной ассоциации арсенидами никеля и кобальта; *г-д* – зональные минеральные агрегаты арсенидов, иллюстрирующие последовательность их кристаллизации.

Bi – самородный висмут, Cbt – кобальтин, Gn – галенит, Nc – никелин, Rmb – раммельсбергит, Skt – скуттерудит, Sf – сфалерит.



Отмеченные в единичном случае микровключения кобальтина внутри зерна никелина (рис. 4, з) не позволяют достоверно определить его место в описываемой последовательности отложения минералов. По мнению авторов, на отдельных участках, в варьирующих  $fO_2$ -рН условиях минералообразования, кобальтин проявляется как замещающий никелин минерал.

Химические особенности минералов арсенидной ассоциации представлены в таблице 2.

В никелине (NiAs) в заметных количествах присутствуют характерные изоморфные примеси кобальта (0.29–1.18 мас. %) и Sb (0.25–2.29 мас. %). В небольших количествах никелин содержит примеси Fe (0.10–0.15 мас. %), Se (0.10–0.79 мас. %) и Te (0.11–0.69 мас. %).

В раммельсбергите (NiAs<sub>2</sub>) в незначительных количествах присутствуют изоморфные кобальт и железо, а сера и частично сурьма изоморфно замещают мышьяк. Содержание висмута, возможно, обусловлено механической примесью.

Скуттерудит (CoAs<sub>3</sub>) постоянно содержит изоморфные примеси Ni (1.22–2.57 мас. %), Fe (0.74–2.21 мас. %), S (0.10–0.20 мас. %). В некоторых зернах скуттерудита обнаружены небольшие количества Pb (0.12–0.20 мас. %), Bi (0.10–1.49 мас. %), вероятнее всего связанные с микровключениями других минералов.

Кобальтин (CoAsS) в силу высокой изоморфной примеси Ni (11.36–13.81 мас. %) отнесен к разновидности — *никелистый кобальтин*. Для него характерна постоянная изоморфная примесь железа (2.52–2.77 мас. %).

В минералого-геохимическом отношении арсенидная никелин-раммельсбергит-скуттерудитовая ассоциация может параллелизоваться с минеральным парагенезисом мышьяк-стибарсеновых почек с арсенидами железа [18].

**Теллуридная серебро-висмутовая** ассоциация сформировалась после отложения арсенидной. Рудные минералы ассоциации представлены доминирующим самородным висмутом II, теллуридами висмута и серебра — хедлейитом и гесситом. Согласно дополненным авторами настоящей публикации данным [14], однотипная ассоциация присутствует в самородках висмута.

Висмут II и теллуриды наблюдаются в тонком проращении с минералами ранних ассоциаций (рис. 5, а) и присутствуют в составе коррозионных кайм сложного состава, которые обрамляют сфалерит-галенитовые агрегаты (рис. 5, б). Минералы образуют также тонкие секущие прожилковидные выделе-

ния в агрегате арсенидных минералов и наблюдаются в виде редких самостоятельных вкраплений в силикатном матриксе породы (рис. 5, в).

В некоторых участках пространственного совмещения ассоциаций минералы более ранних ассоциаций выглядят как реликтовые зерна, заключенные в матриксе самородного висмута II (рис. 5, з, д). Таким образом, характер выделений минералов висмут-теллуридной ассоциации определенно свидетельствует об их относительно более позднем отложении (рис. 5, а–д).

Микрозондовое изучение минералов (табл. 3) характеризуемой ассоциации показало, что в самородном висмуте II примесей не установлено, а составы теллуридов в целом близки к стехиометрическим. В хедлейите установлены только примеси Sb (0.20–0.27 мас. %) и Pb (0.30–0.39 мас. %). Гессит характеризуется более широким спектром примесей. В нем постоянно фиксируются Sb (0.20–0.27 мас. %) и Bi (0.38–1.05 мас. %) и спорадически — Au (0.45 мас. %), S (0.19–0.23 мас. %) и Pb (0.13–0.35 мас. %). Если примеси золота и серы могут рассматриваться как изоморфные, то присутствие свинца, скорее всего, объясняется погрешностями анализа (захват зондом галенитовой матрицы). Примесь висмута в гессите может быть обусловлена тонким проращением его с хедлейитом или самородным висмутом. Природа зафиксированной в теллуридах примеси сурьмы не определена.

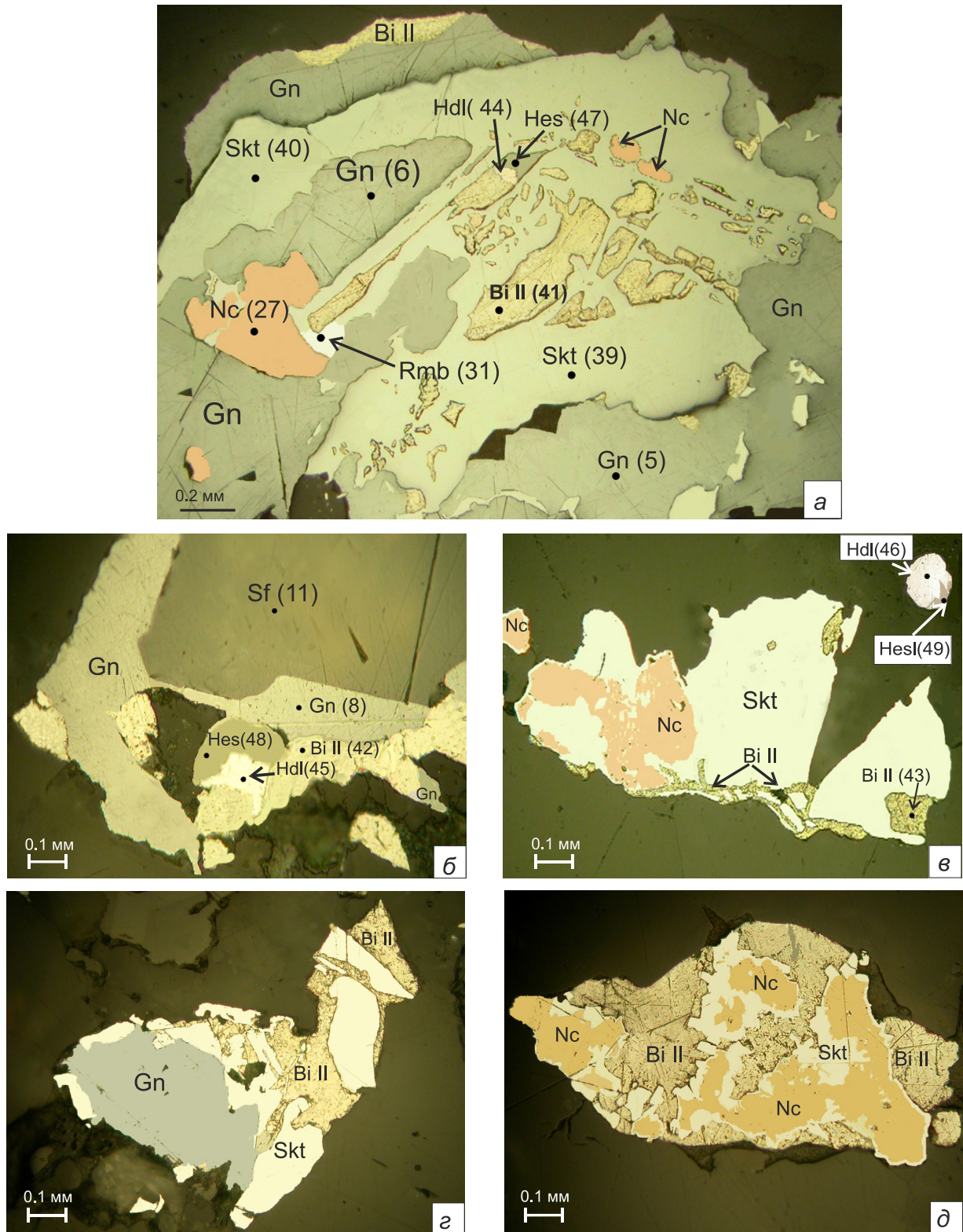
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предваряя обсуждение и обобщение результатов изучения полиминеральных рудных агрегатов в поздних минерализованных полостях в скарнах северо-восточного фланга Партизанского месторождения, отметим, что арсенидная и теллуридная ассоциации вкуче с изученными ранее мышьяк-стибарсеновыми почками и самородками висмута проявлены как геохимически единый Ag-Bi-Ni-Co-As(Sb) минеральный комплекс, который практически идентичен по минеральному составу, типоморфным особенностям и физико-химическим условиям формирования рудам пятиэлементной рудной формации. Известны примеры месторождений, где руды пятиэлементной формации пространственно совмещены со скоплениями сульфидов гидротермально-метасоматического происхождения [3, 26]. Предполагается, что такого рода совмещение локально проявилось и в Дальнегорском рудном районе. Изученная на северо-восточном фланге Партизанского месторождения Ag-Bi-Ni-Co-As(Sb) минерализация, возникшая в пост-скарново-полиметаллический этап минералообразования [20], характеризуется специфическими (экстремальными)

Таблица 2. Состав минералов арсенидной никелин-раммельсбергит-скуттеритовой ассоциации по данным электронно-зондового анализа (мас. %).

№ анализа	№ обр.	Минерал	Co	Ni	Fe	Pb	Bi	As	Sb	S	Se	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
19			0.77	44.14	0.10	–	–	54.04	1.62	–	0.10	–	100.77	(Ni <sub>1.00</sub> Co <sub>0.02</sub> ) <sub>1.02</sub> (As <sub>0.96</sub> Sb <sub>0.02</sub> ) <sub>0.98</sub>
20	674/5-1		0.79	43.68	0.10	–	–	53.50	1.88	–	0.10	0.11	100.16	(Ni <sub>1.00</sub> Co <sub>0.02</sub> ) <sub>1.02</sub> (As <sub>0.96</sub> Sb <sub>0.02</sub> ) <sub>0.98</sub>
21			0.72	44.20	–	–	–	54.44	0.63	–	0.13	–	100.12	(Ni <sub>1.00</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub> (As <sub>0.97</sub> Sb <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub>
22			1.11	43.95	–	–	–	53.31	0.99	–	–	–	99.36	(Ni <sub>1.01</sub> Co <sub>0.03</sub> ) <sub>1.04</sub> (As <sub>0.96</sub> Sb <sub>0.01</sub> ) <sub>0.97</sub>
23	674/5-5	Никелин	1.18	44.25	0.15	–	–	53.26	0.73	–	0.79	0.69	101.05	(Ni <sub>1.00</sub> Co <sub>0.03</sub> ) <sub>1.03</sub> (As <sub>0.94</sub> Sb <sub>0.01</sub> Se <sub>0.01</sub> ) <sub>0.96</sub>
24	674/5-1		0.54	43.86	0.13	–	–	53.95	1.57	–	–	–	100.05	(Ni <sub>1.00</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub> (As <sub>0.97</sub> Sb <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub>
25	674/5-2		0.29	43.87	0.10	–	–	56.30	0.25	–	0.22	0.32	101.35	(Ni <sub>0.99</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> As <sub>0.99</sub>
26			0.38	43.95	0.10	–	–	56.22	0.35	–	0.32	0.30	101.62	(Ni <sub>0.99</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> As <sub>0.99</sub>
27	674/5-3		0.55	43.27	–	–	–	53.09	2.29	–	–	–	99.20	(Ni <sub>1.00</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.01</sub> (As <sub>0.96</sub> Sb <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub>
28	674/5-1		0.45	28.81	0.14	–	0.10	70.79	0.15	0.10	0.20	0.15	100.89	(Ni <sub>1.02</sub> Co <sub>0.02</sub> ) <sub>1.04</sub> As <sub>1.96</sub>
29		Раммельсбергит	0.41	27.73	0.14	–	0.20	71.28	0.30	0.78	0.16	0.19	101.19	(Ni <sub>0.97</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (As <sub>1.95</sub> S <sub>0.05</sub> ) <sub>2.00</sub>
30	674/5-2		–	28.60	–	0.10	0.12	71.80	0.13	0.62	0.22	0.32	101.91	Ni <sub>1.00</sub> (As <sub>1.96</sub> S <sub>0.04</sub> ) <sub>2.00</sub>
31	674/5-3		0.23	28.54	–	0.29	0.20	67.74	0.11	0.94	–	–	98.07	(Ni <sub>1.02</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.03</sub> (As <sub>1.91</sub> S <sub>0.06</sub> ) <sub>1.97</sub>
32		Никелистый кобальтин	20.87	11.36	2.61	–	0.81	43.60	–	20.56	–	–	99.81	(Co <sub>0.58</sub> Ni <sub>0.32</sub> Fe <sub>0.08</sub> Bi <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> As <sub>0.96</sub> S <sub>1.06</sub>
33	674/5-1		17.88	13.59	2.52	–	0.58	44.63	0.42	19.85	–	–	99.47	(Co <sub>0.51</sub> Ni <sub>0.39</sub> Fe <sub>0.08</sub> ) <sub>0.98</sub> (As <sub>0.99</sub> Sb <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> S <sub>1.03</sub>
34	674/5-5		18.04	1.31	1.82	–	0.20	78.13	–	0.12	–	–	99.62	(Co <sub>0.87</sub> Fe <sub>0.09</sub> Ni <sub>0.06</sub> ) <sub>1.02</sub> (As <sub>2.96</sub> S <sub>0.01</sub> ) <sub>2.97</sub>
35			17.57	1.44	2.06	–	0.13	78.67	–	0.18	–	–	100.05	(Co <sub>0.84</sub> Fe <sub>0.10</sub> Ni <sub>0.07</sub> ) <sub>1.01</sub> (As <sub>2.97</sub> S <sub>0.02</sub> ) <sub>2.99</sub>
36	674/5-1		19.00	2.57	0.74	–	0.10	77.94	–	–	–	–	100.35	(Co <sub>0.91</sub> Ni <sub>0.12</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1.07</sub> As <sub>2.93</sub>
37		Скуттерит	19.15	2.28	1.54	0.12	–	77.90	–	0.16	–	–	101.15	(Co <sub>0.91</sub> Ni <sub>0.10</sub> Fe <sub>0.08</sub> ) <sub>1.09</sub> (As <sub>2.90</sub> S <sub>0.01</sub> ) <sub>2.91</sub>
38	674/5-2		19.39	1.50	1.82	0.20	–	78.10	–	0.20	–	–	101.21	(Co <sub>0.91</sub> Fe <sub>0.09</sub> Ni <sub>0.07</sub> ) <sub>1.07</sub> (As <sub>2.90</sub> S <sub>0.02</sub> Se <sub>0.01</sub> ) <sub>2.93</sub>
39			18.04	1.74	1.83	0.13	–	77.41	–	0.10	–	–	99.25	(Co <sub>0.87</sub> Fe <sub>0.09</sub> Ni <sub>0.08</sub> ) <sub>1.04</sub> As <sub>2.95</sub>
40	674/5-1		17.91	1.22	2.21	0.19	1.49	76.43	–	0.10	–	–	99.55	(Co <sub>0.87</sub> Fe <sub>0.11</sub> Ni <sub>0.06</sub> Bi <sub>0.02</sub> ) <sub>1.06</sub> (As <sub>2.93</sub> S <sub>0.01</sub> ) <sub>2.94</sub>

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе «JXA-8100» (ДВГИ, аналитик Г.Б. Молчанова). Прочерк — не обнаружено.



**Рис. 5.** Минералы теллуридной серебро-висмутовой ассоциации и их соотношение с минералами сульфидной и арсенидной ассоциаций.

*a* – тонкое прораствание хедлейита, гессита и висмута II с минералами ранних ассоциаций; *б* – замещение сфалерит-галенитового агрегата минералами теллуридной ассоциации; *в* – прожилковидные выделения Bi II в агрегате арсенидных минералов; *г*, *д* – активное замещение висмутом II минералов предшесствующих ассоциаций. Bi – самородный висмут, Gn – галенит, Hdl – хедлейит, Hes – гессит, Nc – никелин, Rmb – раммельсбергит, Skt – скуттерудит.



Таблица 3. Состав минералов теллуридной серебро-висмутовой ассоциации по данным электронно-зондового анализа (мас. %).

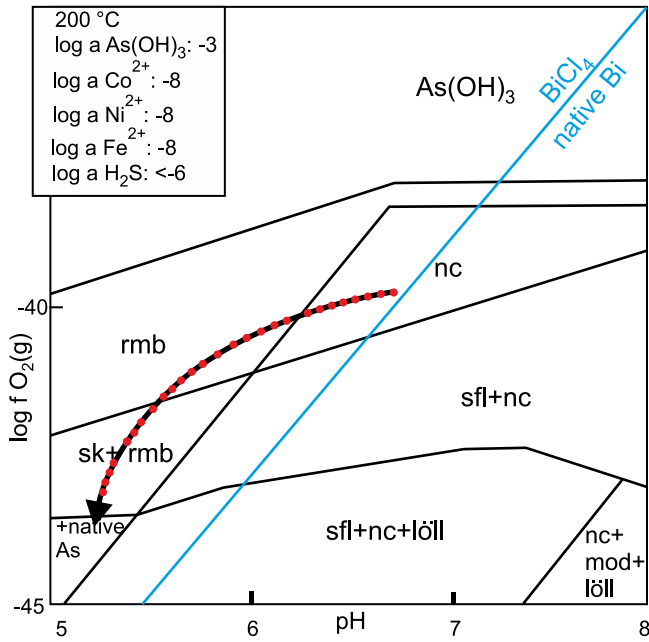
№ анализа	№ обр.	Минерал	Au	Ag	Pb	Bi	Sb	S	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
41	674/5-3					99.48				99.48	
42	674/5-2	Висмут II				99.38				99.38	
43	674/5-4					99.02				99.02	
44	674/5-3	Хелдейт			0.39	79.04			20.09	99.52	$(\text{Bi}_{2.11}\text{Pb}_{0.01})_{2.12}\text{Te}_{0.88}$
45	674/5-2					78.98	0.27		20.88	100.13	$\text{Bi}_{2.08}(\text{Te}_{0.90}\text{Sb}_{0.01})_{0.91}$
46	674/5-4			0.30	79.30	0.20			20.30	100.10	$(\text{Bi}_{2.10}\text{Pb}_{0.01})_{2.11}(\text{Te}_{0.88}\text{Sb}_{0.01})_{0.89}$
47	674/5-3		0.45	62.96	0.13	0.52	0.16	0.19	36.16	100.57	$(\text{Ag}_{1.99}\text{Au}_{0.01}\text{Bi}_{0.01})_{2.01}(\text{Te}_{0.97}\text{S}_{0.02})_{0.99}$
48	674/5-2	Гессит		62.02	0.25	1.05	0.31	0.23	35.94	99.80	$(\text{Ag}_{1.99}\text{Bi}_{0.02}\text{Sb}_{0.01})_{2.01}(\text{Te}_{0.97}\text{S}_{0.02})_{0.99}$
49	674/5-4			61.90		0.38	0.18		37.12	99.58	$(\text{Ag}_{1.98}\text{Bi}_{0.01}\text{Sb}_{0.01})_{2.00}\text{Te}_{1.01}$

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе "JXA-8100" (ДВГИ, аналитик Г.Б. Молчанова). Прочерк – не обнаружено.

условиями образования. Некоторая пространственная разобщенность «микроассоциаций», локализованных в обособленных полостях, не является парадоксом, а соответствует типовому для Ag-Bi-Ni-Co-As месторождений явлению, когда в локальном объеме сложно построенных рудных зон одновременно формируется серия обособленных жильных полостей с преобладанием того или иного минерального вещества [27].

В ходе предшествующего детального изучения минералогии Партизанского месторождения было установлено [19, 20], что формирование типовой сульфидной минерализации с низкожелезистым сфалеритом и Ag-Bi-носным галенитом корневой зоны скарновой колонны на северо-восточном фланге месторождения происходило при температуре около 400 °C при значениях  $\lg f\text{O}_2$ , близких -27. Изученная Ni-Co арсенидная и сопряженная с ней теллуридная ассоциации не проявляют какой-либо приемственности состава или условий кристаллизации по отношению к скарново-сульфидным образованиям, на которые они наложены. Показано, что низкомышьяковистый флюид, сформировавший галенит-сфалеритовый парагенезис в корневой части скарновой колонны, при практически полном отсутствии теннантитовой составляющей в блеклых рудах, резко сменяется средой с аномально высокой активностью мышьяка и висмута. О характере этой среды можно судить по данным изучения парагенной теллуридной серебро-висмутовой ассоциации и аналогичной минеральной ассоциации самородков висмута. Исследования самородков висмута, выполненные С.В. Малинко с соавторами [14], позволяют говорить о высокой восстановленности формирующего их флюида. Присутствие графита в висмуте и закапсулированных в его металлическом матриксе включений жидких (!) углеводородов указывает на экстремальную насыщенность среды минералообразования углеводородами. При этом, ориентируясь на данные об устойчивости парагенного с висмутом гессита [28], можно предполагать, что формирование как изученной теллуридной серебро-висмутовой ассоциации, так и самородков висмута происходило при значениях  $\lg f\text{O}_2$  в интервале от -30 до -50 в нейтральной или щелочной среде.

При отсутствии минералов-индикаторов, уровень восстановленности флюида, сформировавшего Co-Ni арсениды, можно оценить на основе термодинамических моделей, используемых в практике изучения месторождений пятиэлементной формации. Поля устойчивости Co-Ni арсенидов (рис. 6), представленные на диаграмме системы  $\text{Ni/Co} - \text{As} - \text{H}_2\text{O}$  при 200 °C [25], показывают, что кристаллизация Co-Ni арсенидов в установленной нами последовательности: никелин ( $\text{NiAs}$ ) → раммельсбергит ( $\text{NiAs}_2$ ) →



**Рис. 6.** Модельная термодинамическая диаграмма полей устойчивости арсенидов (predominance diagram  $\log fO_2$  vs pH) в системе Ni/Co – As – H<sub>2</sub>O, заимствованная из [25], с дополнением.

Тренд изменения режима формирования изученной арсенидной ассоциации показан на диаграмме в виде дополнения – толстой красной линией. Буквенные обозначения: nc – никелин; rmb – раммельсбергит; sk – скуттерудит; sfl – сафлорит; mod – модерит; löll – лелленгит; native As – самородный мышьяк, native Bi – самородный висмут.

скуттерудит (CoAs<sub>3</sub>) – проходила в экстремально восстановительной среде, в динамике снижения значений  $\log fO_2$  от -40.0 до -42.0, при понижении pH среды от 7 до 5. Последовательная смена моноарсенидов диарсенидами и триарсенидами дает основание предполагать значительный рост активности мышьяка в процессе их кристаллизации. На диаграмме видно, что на непосредственном продолжении модельного тренда роста восстановленности среды вслед за Ni-Co арсенидами происходит формирование самородного мышьяка. В реальных наблюдениях это находит свое подтверждение в образовании мышьяк-стибарсеновых минеральных почек в палеогидротермальных полостях. Результаты изучения минеральных почек предметно согласуются с модельными построениями. По нашим данным [18], самородный мышьяк кристаллизовался при температуре 180–195 °C. Судя по обилию включений твердых битумов в матриксе минеральных почек и присутствию твердых и газообразных углеводородов в составе газовой флюидной фазы включений в парагенном мышьяку кальците, процесс происходит, как и в случае с самородками вис-

мута, при аномально высокой насыщенности флюида углеводородами. В модельных построениях на фоне кристаллизации самородного мышьяка при тех же низких значениях  $fO_2$  на уровне -42.0 повышение pH приводит к кристаллизации арсенида железа. Это находит свое вещественное выражение в присутствии в составе мышьяк-стибарсеновых агрегатов леллингита (FeAs<sub>2</sub>) [18]. Фиксируемая синхронная с леллингитом кристаллизация антимонита (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) свидетельствует о присутствии в составе флюида, формирующего арсениды, серы. Подчеркнем, рост щелочности среды при тех же условиях приводит к образованию самородного висмута.

Предметным вопросом является природа обогащенного мышьяком углеводородного флюида, преобразующего палеогидротермальную систему. Локальность проявленных изменений среды свидетельствует о локальной пространственной привязанности источника изменений. Вероятнее всего, источником углеводородного флюида выступали присутствующие в скарновой зоне и в непосредственной близости от нее фрагменты фтанитовых пород триасового возраста. Данные геохимического изучения, краш-теста и пиролиза [21] указывают, что именно фтаниты, при их высокой газовой насыщенности на уровне 6–7 см<sup>3</sup>/кг, могли генерировать в условиях документированного [1] проявления динамотермальных преобразований (natural fracking) углеводородный поток флюидов, участвующий в образовании арсенидов и родственных им минеральных образований. Принимая во внимание данные [1, 5, 21] об обогащенности фтанитов никелем (до 156 г/т), кобальтом (до 180 г/т), мышьяком (до 600 г/т) и присутствии мышьяка в подвижной форме элементоорганических соединений, считаем, что именно сформированный в результате динамотермального преобразования фтанитов, обогащенный рудными элементами и мышьяком, углеводородный поток обеспечивал привнос мышьяка и металлов в зону рудоотложения и стимулировал образование характеризуемого минерального комплекса. Прямым свидетельством этого является присутствие в графитизированных фтанитах тонкой вкрапленности скуттерудита и герсдорфита. Высокая восстановленность углеводородного флюида, генерируемого в процессе преобразования фтанитов, находит отражение в обилии включений самородных металлов в их углеродистом матриксе. По данным [21], наиболее распространены характерные минералы-индикаторы высоко восстановленной среды в виде никелистого железа, самородного алюминия и самородного цинка.

Указанные представления в полной мере согласуются с моделью формирования месторождений

пятиэлементной формации [23], которые представляются как гидротермальная система с преобладанием сульфидов, импульсно модифицированная притоком сильно восстановленной газовой или жидкой фазы с доминированием углеводородов. Модельным источником углеводородной флюидной среды выступают тектонизированные, обогащенные углеродистым веществом рудовмещающие породы, преобразованные в процессе природного гидроразрыва пласта (natural fracking) [27]. Метан и другие углеводороды обеспечивают экстремально высокую восстановленность и изменчивость среды и, как результат, формирование пространственно обособленных скоплений Co-Ni арсенидов, скоплений самородного мышьяка и самородного висмута [25]. Металлоносность характерных для аккреционно-складчатого комплекса Сихотэ-Алиня углеродистых кремнисто-глинистых пород триасового возраста активно обсуждается в современной литературе [5, 9–11]. Подчеркивается потенциальная возможность обогащения рудных зон благородными металлами за счет углеводородного флюидного потока, возникающего в результате динамометаморфических преобразований фтанитов. Наши исследования поддерживают и развивают в определенной части эти построения.

Представляется, что фтаниты, обеспечивающие обогащение углеводородами рудоносного флюида на поздней стадии развития скарново-гидротермального процесса, выступали как промежуточный коллектор мышьяка и металлов. Конкретизация указанного связывается с детальными минералого-геохимическими исследованиями руд и вмещающих пород при широком привлечении термодинамических, термобарогеохимических и изотопных данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученный минеральный комплекс Ni-Co арсенидов и Ag-Bi теллуридов, присутствующий в кавернозных датолит-андрадитовых скарнах северо-восточного фланга Партизанского В-Pb-Zn месторождения, был образован вслед за сульфидными рудами скарновой природы, вероятно, в условиях углеводородной, высоко восстановленной флюидной среды. Источником углеводородов, с высокой вероятностью, выступают триасовые фтаниты рудовмещающей олистостромовой толщи, преобразованные в результате процессов природного гидроразрыва пласта (natural fracking). Специфика образования изученных арсенидных и теллуридных минеральных образований, вкуче с данными о формировании на северо-восточном фланге месторождения ранее изученных геохимически родственных им скоплений самородного висмута и мышьяка, соответствует современной, широко

обсуждаемой модели формирования месторождений пятиэлементной формации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.Ю., Баскина В.А., Томсон И.Н. О природе углеродистых пород в зонах дробления в Дальнегорском районе Приморья (черные сланцы или мантийные ильменит-графитовые породы?) // Докл. АН. 2007. Т. 413, № 3. С. 364–369.
2. Благодарева Н.С. Микроминералы сульфидных руд Дальнегорского района // Геохимия вулcano-плутонических ассоциаций и эндогенные месторождения Дальнего Востока. 1977. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, С. 69–72.
3. Борисенко А.С., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г. Условия образования гидротермальных кобальтовых месторождений. Новосибирск: Наука, 1984. 173 с.
4. Буслаева Е.Ю. Элементоорганические соединения в эндогенных рудах: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.: ИГЕМ РАН, 1991. 19 с.
5. Волохин Ю.Г., Иванов В.В. Геохимия и металлоносность углеродистых силицитов триаса Сихотэ-Алиня // Литология и полез. ископаемые. 2007. № 4. С. 406–425.
6. Геология свинцово-цинковых месторождений Приморья // Тр. Института геологии руд. месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР. Вып. 43. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 328 с.
7. Говоров И.Н. Геохимия рудных районов Приморья. М.: Наука, 1977. 251 с.
8. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
9. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Нарнов Г.А. Акцессорная минерализация в скарнах Дальнегорского рудного района (Сихотэ-Алинь) // Зап. РМО. 2012. № 4. С. 73–96.
10. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. Состав и генезис акцессорной минерализации в марганцево-силикатных породах триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 6. С. 807–819. DOI: 10.15372/GiG2019040
11. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. Висмутовая минерализация Белогорского магнетитового месторождения (Сихотэ-Алинь) // Тихоокеан. геология. 2022. Т. 41, № 1. С. 90–109. DOI: 10.30911/0207-4028-2022-41-1-90-109
12. Кузенная Е.В., Пономарева Н.И. Кобальтовая минерализация в скарнах Дальнегорского боросиликатного месторождения (Приморье, Россия) // Зап. РМО. 2006. Т. 135, № 3. С. 84–89.
13. Лейер П., Раткин В.В. Первое прямое  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ -определение возраста скарнов Дальнегорского рудного района на юге Дальнего Востока России // Докл. АН СССР. 1997. Т. 352, № 2. С. 222–225.
14. Малинко С.В., Дубинчук В.Т., Носенко Н.А. Самородный висмут в датолитовых рудах Дальнегорского борного месторождения // Минералогический журн. 1992. 14. № 1. С. 42–52.
15. Носенко Н.А., Чернышов А.В. Сульфидная минерализация Дальнегорского скарново-боросиликатного месторождения // Новые данные по минералогии Дальнего Востока. Владивосток, 1987. С. 34–48.
16. Носенко Н.А., Чернышов А.В. Сульфидная минерализация



- Дальнегорского скарново-боросиликатного месторождения / Новые данные по минералогии Дальнего Востока. Владивосток. 1987. С. 34–48.
17. Раткин В.В., Елисеева О.А., Пандиан М.С и др. Этапность и условия формирования продуктивных минеральных ассоциаций Дальнегорского боросиликатного месторождения (Сихотэ-Алинь) // Зап. РМО. 2017. Ч. 146, № 5. С. 1–17.
  18. Симаненко Л.Ф., Раткин В.В., Пахомова В.А. и др. Самородные минералы группы мышьяка в скарновых рудах дальнегорского боросиликатного месторождения // Тихоокеан. геология. 1994. № 2. С. 39–45.
  19. Симаненко Л.Ф. О формах нахождения примесей в галените Партизанского скарново-полиметаллического месторождения (Приморье) // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 2. С. 45–55.
  20. Симаненко Л.Ф., Раткин В.В. Партизанское скарново-полиметаллическое месторождение. М.: Наука, 2008. 158 с.
  21. Томсон И.Н., Полякова О.П., Полохов В.П. и др. Условия образования эндогенных «черных сланцев // Геология руд. месторождений. 1993. Т. 35, № 4. С. 344–351.
  22. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д. и др. Геология и полезные ископаемые Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 1995. 66 с.
  23. Burisch M., Gerdes A., Walter B.F. et al. Methane and the origin of five-element veins: Mineralogy, age, fluid inclusion chemistry and ore forming processes in the Odenwald, SW Germany // Ore Geol. Rev. 2017. 81. P. 42–61.
  24. Chugaev A.V., Chernyshev I.V., Ratkin V.V. et al. Contribution of crustal and mantle sources to genesis of Sn, B and Pb-Zn deposits in South Sikhote-Alin subprovince (Russian Far East): Evidence from high-precision MC-ICP-MS lead isotope study // Ore Geol. Rev. 2020. 125. 103683. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103683
  25. Kreissl S., Gerdes A., Walter B.F. et al. Reconstruction of a >200 Ma multi-stage five element Bi-Co-Ni-Fe-As-S system in the Penninic Alps, Switzerland // Ore Geol. Revi. 2018. 95. P. 746–788.
  26. Maacha L., Lebedev V.I., Sddii O. et al. Arsenide deposits of the Bou Azzer ore district (Anti-Atlas metallogenic province) and their economic outlook. Kyzyl: TuvIENR SB RAS. 2015. 66 p.

*Рекомендована к печати Н.А. Горячевым*

после доработки 28.02.2023 г.

принята к печати 24.03.2023 г.

*L.F. Simanenko, V.V. Ratkin, V.A. Pakhomova, O.A. Eliseeva*

### Ni-Co arsenides and Ag-Bi tellurides in B-Pb-Zn skarns of the Partizanskoe deposit (Dalnegorsky ore district, Sikhote-Alin, Russia)

Mineralogical and geochemical studies of the northeastern flank of the Partizanskoe deposit in the zone of its junction with the Dalnegorskoe borosilicate deposit revealed the superimposed Ni-Co arsenide and Ag-Bi telluride mineralization hosted in Pb-Zn ores of the Bolnichny ore body. The typomorphic features of arsenides and tellurides, the sequence and physicochemical conditions of their formation were studied. Rammelsbergite and hessite were found at the deposit for the first time. The authors assume that the arsenide and telluride assemblages formed after the completion of the main skarn-sulphide stage of ore formation. Together with the earlier mineralogical finds of large Bi nuggets and reniform aggregates of native As and Sb in the same junction area, the arsenide-telluride mineralization can be assigned to the geochemically unified Ag-Bi-Ni-Co-As(Sb) mineral assemblage, which in its geochemical features is a miniature of the ores of hydrothermal (five-element vein-type) deposits.

**Key words:** B-Pb-Zn skarns, nickeline, rammelsbergite, scutterudite, hedleyite, hessite, native bismuth, five-element vein-type deposits, Dalnegorsk, Sikhote-Alin.

14. Малинко С.В., Дубинчук В.Т., Носенко Н.А. Самородный висмут в датолитовых рудах Дальнегорского борного месторождения // Минералогический журнал. 1992. 14. № 1. С. 42–52.