

Особенности минералогии руд южного фланга золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка)

Mineralogy of the ores on the southern flank of the Mutnovskoe gold-silver-polymetallic deposit (Southern Kamchatka)

Шишканова К. О., Округин В. М.,
Философова Т. М.

Shishkanova K. O., Okrugin V. M.,
Philosofova T. M.

Мутновское месторождение – один из крупнейших и наиболее перспективных объектов Южно-Камчатского горнорудного района. В пределах главной жильной зоны Определяющая выделены северный и южный фланги, сложенные малосульфидным (золото-серебряным) и сульфидно-полиметаллическим (золото-серебро-полиметаллическим) типами руд соответственно. Приведены результаты комплексных минералого-геохимических исследований золото-серебро-полиметаллических руд южного фланга месторождения. Рассмотрены особенности текстур и структур, минерального и химического составов, генезиса руд, а также формы нахождения благородных и цветных металлов. Охарактеризованы типоморфные особенности пирита, сфалерита, галенита, халькопирита, блеклых руд, теллуридов Au, Ag, Pb, Bi, самородного золота, сульфосолей Bi, Se, Ag. Выделены пирит-сфалерит-кварцевая, сфалерит-галенит-кварцевая, халькопирит-блеклорудная минеральные ассоциации. Определены температура и состав рудообразующих растворов.

Ключевые слова: Камчатка, Мутновское, рудообразование, пирит, сфалерит, блеклые руды, золото, серебро, теллуrowисмутит, тетрадимит, берриит.

The Mutnovskoe deposit is one of the largest and most prospective ore deposits in South Kamchatka. The northern and southern flanks within the main veining zone Opredelyayushchaya, composed of low-sulfide (gold-silver) and sulfide-polymetallic (gold-silver-polymetallic) types of ores, respectively, are distinguished. The paper presents the results of the complex mineralogical and geochemical studies of the gold-silver-polymetallic ores of the southern flank of the deposit. Features of textures and structures, mineral, chemical compositions and genesis of the ores, as well forms of precious and base metals occurrences are shown. Typomorphic features of pyrite, sphalerite, galena, chalcopryrite, tennantite-tetrahedrite, Au, Ag, Pb and Bi tellurides, native gold, Bi, Se and Ag sulfosalts are characterized. The pyrite-sphalerite-quartz, sphalerite-galena-quartz, and chalcopryrite-tennantite-tetrahedrite mineral associations are distinguished. The temperatures and composition of ore-forming solutions are shown.

Keywords: Kamchatka, Mutnovskoe, ore formation, pyrite, sphalerite, tennantite-tetrahedrite, gold, silver, tellurobismutite, tetradimite, berryite.

Для цитирования: Шишканова К. О., Округин В. М., Философова Т. М. Особенности минералогии руд южного фланга золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка). Руды и металлы. 2022. № 3. С. 78–100. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10018.

For citation: Shishkanova K. O., Okrugin V. M., Philosofova T. M. Mineralogy of the ores on the southern flank of the Mutnovskoe gold-silver-polymetallic deposit (Southern Kamchatka). Ores and metals, 2022, № 3, pp. 78–100. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10018.



Эпитермальные месторождения вошли в число ведущих источников золота и серебра во второй половине XX века. Такие объекты широко развиты в пределах Тихоокеанского Огненного кольца. На сегодняшний день Камчатский край – один из наиболее перспективных горнорудных районов России, что во многом связано с наличием эпитермальных золото-рудных месторождений класса *lowsulfidation*, локализованных в четырёх разновозрастных вулканических поясах северо-западной части зоны перехода континент-океан и вулканических дугах Японии – от Охотско-Чукотского мел-палеогенового до Восточно-Камчатского плейстоцен-четвертичного.

К числу перспективных комплексных золото-серебро-полиметаллических рудных объектов относится Мутновское вулканогенное гидротермальное жильное месторождение. Это один из крупнейших рудных объектов Камчатского края, расположенный в пределах Южно-Камчатского плейстоцен-четвертичного вулканического пояса. Его прогнозные ресурсы составляют более 10 т золота, до 5–10 тыс. т серебра [8, 13, 16, 17].

Регулярные исследования Камчатки были начаты ещё в 30-е гг. XX века. В 1932 г. краевед П. А. Новограбленов опубликовал «Атлас вулканов Камчатки», где дал сведения о 19 действующих вулканах. В 1935 г. на полуострове была создана академическая служба наблюдений за действующими вулканами [3]. В 1950–1970 гг. на Камчатке проведены крупномасштабные геологические, гидрогеологические, геофизические и другие виды исследований. Месторождение Мутновское известно с 1962 г., но интенсивные поисково-разведочные работы в районе Южной Камчатки выполнены только в 70-е гг. И в 1973 г. в пределах Мутновско-Асачинского вулканогенно-рудного центра сотрудником ИВиС ДВО РАН Е. А. Вакиным впервые описаны и опробованы кварцевые жилы в верховьях р. Мутновская [4]. В последующие годы на площади месторождения осуществлены поисково-разведочные работы, включающие проходку канав, траншей и скважин. Было уточнено геологическое строение, выявлены геолого-структурная позиция оруденения, оконтурены и

опробованы рудные тела. В это же время сотрудниками ИВиС ДВО РАН, ЦНИГРИ проведены специальные минералогические исследования, по результатам которых были подготовлены отдельные статьи и публикации, а также отчёты коллективов сотрудников геологоразведочных экспедиций ПГО «Камчатгеология» [11].

В 80–90-е гг. на месторождении выполнены тематические работы по комплексному изучению золото-серебро-полиметаллического оруденения, позволившие интерпретировать структурную позицию и возраст продуктивной минерализации Южной Камчатки [18]. В 1992 г. Постановлением главы администрации Камчатской области объявлен международный конкурс предложений на право разведки и эксплуатации группы золоторудных месторождений юга Камчатки, куда вошло и Мутновское. Но в связи с ухудшением экономической и социальной обстановки в регионе данная работа так и не была начата [7]. За всё время поисково-разведочных работ на месторождении в 70–80-х гг. пробурено более 20 скважин общей протяжённостью более 10 000 м, а также пройдены многочисленные канавы и траншеи [16, 23].

В начале 2000-х гг. предприняты попытки возобновить геологические работы на месторождении Временным творческим коллективом (ВТК) по Трудовому соглашению с ООО «СТЭППС ИСТ» в соответствии с геологическим заданием, главной целью которых стали обоснование и разработка временных разведочных кондиций для подсчёта запасов мало-сульфидных золото-серебряных руд [19].

В основу данной публикации положены результаты многолетних исследований сотрудников лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН (70–90-е гг. XX и 2000-е гг. XXI веков). Авторы пользовались коллекциями, собранными в ходе тематических научно-исследовательских хозяйственных работ с ОАО «Камчатгеология» в 70–80-х гг. и контрольно-ревизионных маршрутов в 2005 и 2010 гг.

В работе представлена коллекция каменного материала из канав, траншей, керн буровых скважин. Методы исследований: оптиче-

ская микроскопия, рентгенофлуоресцентный (РФА), спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП), рентгеноспектральный анализ, сканирующая электронная микроскопия, термобарогеохимия. В лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) проанализированы текстурно-структурные особенности и вещественный состав руд, проведены микротермометрические исследования флюидных включений. Для изучения минералогическо-петрографических особенностей применялись прецизионные автоматизированные микроскопы Axioskop 40, SteREO Discovery. V12 (Carl Zeiss), Eclipse LV 100 pol (Nikon). Составы рудных минералов определялись с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора Camebax 244 с четырьмя волновыми и одним энергетическим спектрометрами и приставкой Inca Oxford Instruments. Условия съёмки: тонко сфокусированный пучок электронов (1,5–5,0 мкм), ускоренных до 25 кВ, суммарный ток 25–50 нА. Микроморфология, микроструктура, степень однородности-неоднородности минералов исследовались на приборе Vega 3 Tescan с энергодисперсионным и волновым спектрометрами X-тах с площадью кристалла 50 мм². Измерения проводились при высоком вакууме 2,9–0,9^{е-005} мбар, фокусном расстоянии 15 мм, ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 917 пА. Для анализа использовалось программное обеспечение AZtec Oxford Instruments версии 3,1.

Микротермометрические исследования флюидных включений выполнены при помощи комплекса оборудования, созданного на основе поляризационного микроскопа Eclipse LV 100 pol (Nikon), совмещённого с блоком обработки и визуализации, термोकриостолика THMSG 600 (Linkam), позволяющего осуществлять измерения в интервале температур -196...+600 °С.

Мутновское отнесено к комплексному золото-серебро-полиметаллическому месторождению с общей площадью территории 10 км². Оно находится в 60 км к юго-западу от краевого центра – г. Петропавловск-Камчатский, между Родниковым эпитегрмальным золото-

серебряным и Северо-Мутновским парогидротермальным месторождениями, в верхнем течении р. Мутновская и её притоков – ручьёв Жёлтый, Рудный, Августовский (рис. 1). Территория сравнительно хорошо изучена, отличается развитой дорожной сетью, которая соединяет г. Петропавловск-Камчатский с Мутновским геотермальным комплексом мощностью 62 мВт и Асачинским ГОКом.

В структурном отношении месторождение приурочено к Мутновско-Асачинскому вулканогенно-рудному металлогеническому центру магматической и гидротермальной деятельности, продолжающейся с миоцена по настоящее время [2, 14, 17, 22]. Район месторождения характеризуется интенсивной вулканической и гидротермальной деятельностью, представляет собой долгоживущий центр эндогенной активности, начавшейся в олигоцене и продолжающейся по сегодняшнее время [9, 10]. Здесь сконцентрированы действующие вулканы Мутновский, Горелый и разнообразные по составу, масштабу и возрасту гидротермальные системы.

Основная рудовмещающая структура месторождения – Жировской палеовулкан позднелигоцен-раннеплейстоценового возраста, располагающийся на пересечении субмеридионального отрезка Южно-Камчатской системы рудоконтролирующих сбросов с Мутновским глубинным разломом северо-восточного простирания [13, 17].

В геологическом строении месторождения участвуют кайнозойские вулканы трёх структурных ярусов: дорудного, рудоносного и пострудного (см. рис. 1).

Дорудный комплекс объединяет олигоцен-миоценовые вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования жировской, ахотенской, мутновской толщ, асачинской свиты и алнейской серии. Вулканогенные образования представлены породами среднего и кислого составов (андезитами, андезибазальтами, дацитами), вулканогенно-осадочные – туфами различной разновидности и состава.

Рудоносный комплекс представлен плейстоценовыми вулканогенно-осадочными образованиями Жировского палеовулкана алней-



ской серии (базальты, андезибазальты, андезиты, их туфы, туфопесчаники).

Пострудный комплекс сложен плейстоценовыми вулканогенно-осадочными образованиями (базальты, андезибазальты, их туфы) и современными голоценовыми отложениями. Водно-ледниковые образования развиты локально на плоских водоразделах левых притоков р. Мутновская и представлены суглинками, супесями, песчано-гравийно-галечным материалом с валунами [1, 17, 19].

Интрузивные образования, достаточно широко развитые в пределах месторождения, характеризуются четырьмя комплексами: олигоценным, миоценовым, плиоценовым, четвертичным. По форме залегания это субвулканические тела, дайки, силлы, трубки взрыва. Олигоценные образования сложены брекчированными андезитами, миоценовые – интрузиями диоритов, габбродиоритов, дайками диоритов, кварцевых диоритов, андезитов, базальтов кварцевых порфиров, плиоценовые – дайками андезитов, трубками взрыва андезитов, андезибазальтов, агломератовыми и псефитовыми туфобрекчиями, четвертичные – базальтами, андезибазальтами [17].

Приуроченность месторождения к постройке Жировского палеовулкана определяет основную роль в его строении вулканических образований. Центральную часть месторождения занимает выведенный на дневную поверхность периферический очаг Жировского палеовулкана. Это сложная комбинация магматических тел типа даек, ригелей, автомагматических брекчий от основного до среднего состава [13, 17, 21, 22, 24]. Основная часть постройки сложена олигоценными вулканиками, прорванными раннемиоценовыми субвулканическими телами различного состава (от базальтов до риолитов) и интрузией габбродиоритов (см. рис. 1) [10, 17]. Жировский палеовулкан размещается на пересечении субмеридионального отрезка Южно-Камчатской системы рудоконтролирующих сбросов с Мутновским глубинным разломом северо-восточного простирания. Его описание появилось лишь в 1989 г. [20]. Возраст постройки по данным К-Ar датирования 0,6–0,8 млн лет [7].

В пределах месторождения выявлено и в различной степени изучено более 160 кварцевых, кварц-карбонатных, карбонатных жил, зон прожилкования, минерализованных зон дробления, несущих золото-серебро-полиметаллическое оруденение. Рудные тела слагают штокверково-жильную зону размером 3×4 км, которая представляет собой сочетание стволовой главной жилы субмеридионального простирания с падениями, близкими к вертикальным, с многочисленными оперяющими более мелкими по размерам жилами и прожилками. В главной жиле, названной «Определяющая», сосредоточено до 80 % всех запасов месторождения. В свою очередь, она обладает сложным внутренним кулисообразным строением, сопровождается большим количеством апофиз, зонами дробления и оперяющими её маломощными жилами, отходящими на 80–100 м [13, 17]. Характеризуется концентрически-зональной структурой, достаточно изометрической формой. С поверхности штокверково-жильная зона прослежена канавами, на глубину изучена буровыми скважинами. Её протяжённость порядка 2700 м при мощности от 3–15 м.

В пределах жильной зоны выделяются северный и южный фланги, резко отличающиеся минеральным составом руд. Кроме того, можно выделить условно вынесенный центральный фланг, локализованный между северным и южным, в районе оврага Рудный (см. рис. 1). Северный фланг жильной зоны размером до 1100 м по простиранию сложен малосульфидным типом руд (золото-серебряным), в которых сосредоточены основные запасы золота. Южный фланг протяжённостью более 1700 м начинается от оврага Рудный (одноимённый ручей), характеризуется преобладанием сульфидно-полиметаллического (золото-серебро-полиметаллического) типа руд. В отличие от северного он более глубоко эродирован. На территории центрального фланга встречаются как золото-серебро-полиметаллические, так и золото-серебро-кварцевые типы руд [17]. Повсеместно по всему месторождению присутствуют марганцевые, марганец-кварц-карбонатные руды [13, 21, 24].

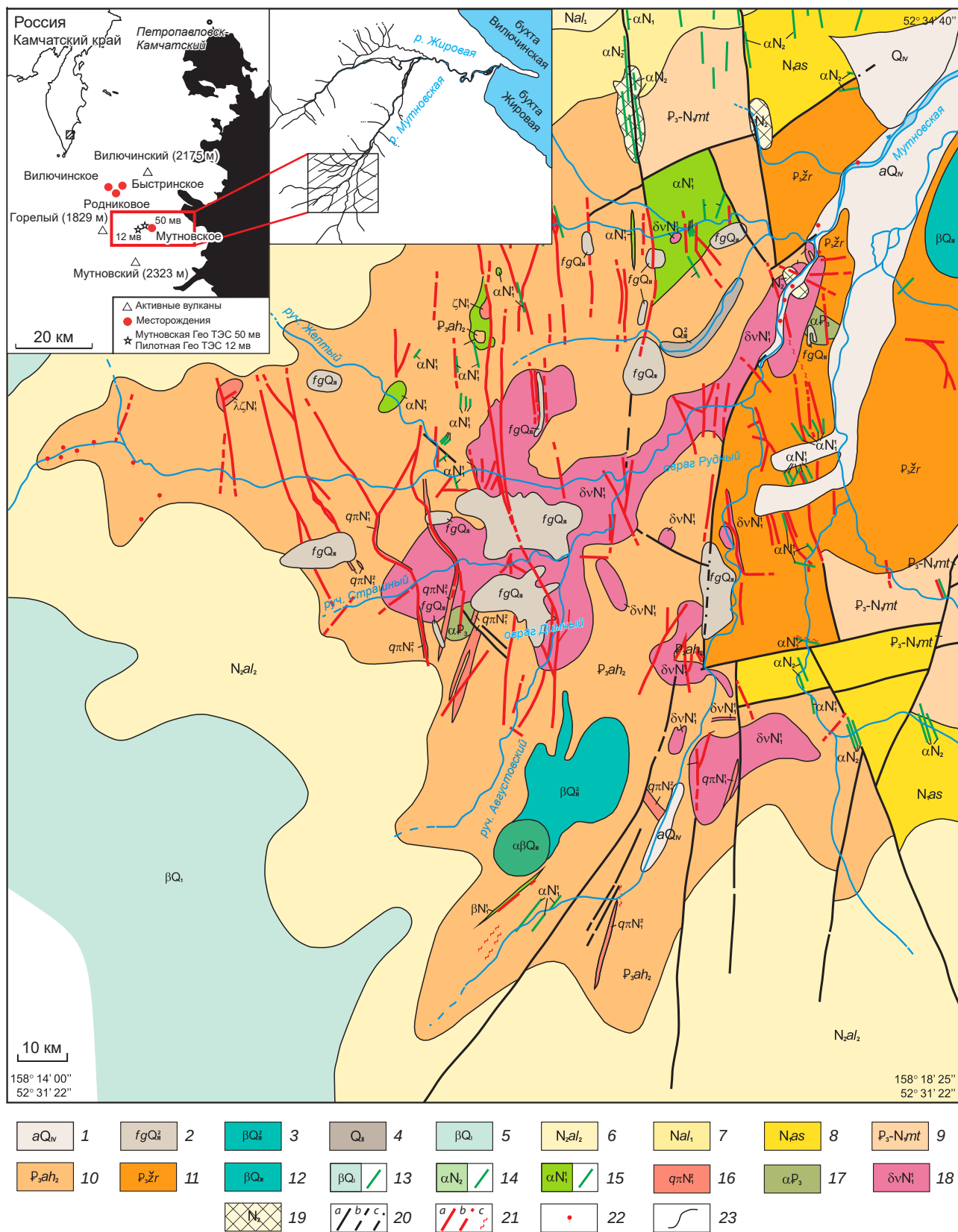




Рис. 1. Фрагмент схематической геологической карты золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (составлена по данным [1]):

пострудный комплекс: 1 – аллювиальные, овально-осыпные отложения, 2 – водно-ледниковые отложения, 3 – базальты, лавобрекчии базальтов, 4 – туффиты, пемзовые туфы, 5 – базальты, андезибазальты, их туфы, конгломераты, туфопесчаники; *рудноносный комплекс:* 6 – алнейская серия (базальты, андезибазальты, андезиты, их туфы, туфопесчаники); *дорудный комплекс:* 7 – алнейская серия (витрокластические туфы, дациты, андезиты и их туфы), 8 – асачинская свита (туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, туффиты, туфы, андезиты), 9 – мутновская толща (туфопесчаники, туфоалевролиты, туффиты, туфы), 10 – ахонтенская толща (андезиты и их туфы, лавобрекчии андезитов, андезибазальтов, туфоалевролиты, алевролиты, аргиллиты), 11 – жировская толща (туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, туффиты, туфы); *субвулканические тела и дайки:* 12, 13 – четвертичный комплекс (базальты, андезибазальты), 14 – плиоценовый комплекс (андезиты), 15, 16 – миоценовый комплекс (андезиты, базальты, кварцевые порфиры), 17 – олигоценовый комплекс (андезиты); 18 – диориты, габбродиориты; 19 – брекчии трубок взрыва; 20 – тектонические нарушения: установленные (а), предполагаемые (б), скрытые под рыхлыми отложениями (с); 21 – гидротермальные жилы: установленные (а), предполагаемые (б), зоны кварцевого, кварц-карбонатного прожилкования (с); 22 – гидротермальные источники; 23 – геологические границы

Fig. 1. A fragment of a schematic geological map of the gold-silver-polymetallic deposit Mutnovskoye (compiled according to [1]):

post-mineralisation complex: 1 – alluvial, oval-scrree deposits, 2 – fluvial-glacial deposits, 3 – basalt, lava breccias of basalt, 4 – tuffite, pumice tuff, 5 – basalt, basaltic andesites, their tuff, conglomerate, tuff sandstone; *syn-mineralisation complex:* 6 – Alneysky series (basalt, basaltic andesite, andesite, their tuff, tuff sandstone); *pre-mineralisation complex:* 7 – Alneysky series (vitroclastic tuff, dacite, andesite and their tuffs), 8 – Asachinskaya formation (tuff gravelite, tuff sandstone, tuff siltstone, tuffite, tuff, andesite), 9 – Mutnovskaya sequence (tuff sandstone, tuff siltstone, tuffite, tuff), 10 – Ahomtenskaya sequence (andesite and their tuff, lava breccia of andesite, basaltic andesite, tuff siltstone, siltstone, mudstone), 11 – Zhirovskaya sequence (tuff gravelite, tuff sandstone, tuff siltstone, tuffite, tuff); subvolcanic bodies and dikes: 12, 13 – Quaternary complex (basalt, basaltic andesite), 14 – Pliocene complex (andesite), 15, 16 – Miocene complex (andesite, basalt, quartz porphyry), 17 – Oligocene complex (andesite); 18 – diorite, gabbrodiorite; 19 – breccia from explosion pipes; 20 – tectonic disturbances: established (a), assumed (b), hidden under loose deposits (c); 21 – hydrothermal veins: identified (a), proposed (b), zones of quartz, quartz-carbonate veining (c); 22 – hydrothermal springs; 23 – geological boundaries

На северном фланге обнаружены пять рудных тел с максимальными содержаниями Au 194,1, Ag 3605,2 г/т. На южном фланге средние содержания Au до 3,2, Ag до 341,6 г/т. Средние содержания по месторождению Pb 0,99 %, Zn 1,13 %, Cd 290 г/т, In 20 г/т, Se 9,0 г/т, Bi 23 г/т. Прогнозные ресурсы категории Р: золота – 14 т, серебра – 455 т [8, 16, 17]. В табл. 1 приведён химический состав руд с максимальными содержаниями, ppm: Au 149,69, Ag 289,96, Cu 203 221, Zn 384 561, Pb 262 101, As 73 775.

Золото-серебро-полиметаллическим рудам свойственно значительное разнообразие текстур и структур. Текстуры: брекчиевая, вкра-

пленная, прожилковая, полосчатая и их комбинации – сочетания брекчиевой с элементами колломорфной, гнездово-вкрапленной; полосчатая и прожилково-вкрапленная; крупстификационно-полосчатая (рис. 2). Наиболее распространена брекчиевая текстура с элементами колломорфной. Чаще всего обломки сложены гидротермально изменёнными породами. Форма обломков угловатая, размеры от 2–3 мм до нескольких сантиметров. Они цементируются сфалеритом, галенитом, пиритом, халькопиритом. Сфалерит является одним из главных рудных минералов, образует различные по форме и размерам обособления:

Табл. 1. Химический состав руд золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское по данным РФА (%), ИСП (ppm)

Table 1. Whole-rock major (wt %) and trace element composition (ppm) of the ores

№№ п/п	Оксиды, элементы	Образцы								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	SiO ₂	24,00	20,00	55,90	30,30	42,00	19,30	90,20	77,20	53,50
2	TiO ₂	0,10	0,08	0,09	0,09	0,13	0,10	0,35	0,09	0,21
3	Al ₂ O ₃	0,69	0,42	2,53	0,15	0,39	0,36	3,06	2,52	3,24
4	Fe ₂ O ₃	0,12	1,62	0,43	10,50	3,61	1,38	<0,01	<0,01	8,54
5	FeO	0,40	0,00	0,57	1,28	0,00	0,00	1,11	0,89	0,00
6	MnO	2,24	4,26	5,10	0,21	0,07	0,07	0,04	5,71	0,07
7	CaO	35,80	3,08	3,31	0,77	0,97	0,57	1,24	1,44	1,46
8	MgO	1,47	5,61	17,70	0,75	0,53	0,53	0,20	3,40	0,41
9	Na ₂ O	0,23	3,66	0,17	0,69	7,62	5,34	0,33	0,26	3,04
10	K ₂ O	0,06	0,04	0,03	0,02	0,07	0,07	1,55	0,12	0,88
11	P ₂ O ₅	0,07	0,08	0,06	0,10	0,08	0,08	0,07	0,06	0,13
12	S	0,73	13,20	0,57	19,70	10,70	10,90	0,20	0,92	5,65
13	F	<0,01	0,27	0,07	<0,01	0,06	0,09	<0,01	0,06	<0,01
14	п. п. п.	34,10	4,10	3,48	13,50	11,80	9,78	1,49	4,13	13,30
15	Σ	100,01	56,42	90,01	78,06	78,03	48,57	99,84	96,80	90,43
16	Cu	44	1660	262	203 221	3889	4044	90	338	14 941
17	Zn	1967	384 561	2276	22 582	310 012	336 140	1378	1585	102 357
18	As	34	95	208	73 775	1071	138	166	941	1929
19	Pb	381	68 853	237	10 227	15 897	262 101	1260	337	195 642
20	Ag	6,61	38,73	54,88	180,56	157,76	226,56	37,33	133,41	289,96
21	Au	0,08	< ПО	0,28	149,69	1,60	0,13	14,38	1,28	1,26

Примечание. Анализы 1–19 выполнены в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский, Н. И. Чеброва, А. О. Садовникова (РФА)), 20, 21 – в ИПТМ РАН (п. г. т. Черноголовка, В. К. Карандашев (ИСП)); оксиды, S, F, п. п. п. в %, остальные – в ppm; 1 – центральная часть месторождения, 2, 5, 8, 9 – южный, 3, 4, 6, 7 – северный фланги. ПО – предел обнаружения.

от единичных зёрен до сложных линзовидных и гнездообразных агрегатов в брекчиевых с элементами колломорфной (до фестончатой), гнездово-вкрапленной, полосчатой и прожилково-вкрапленной текстурах. Гнездово-вкрапленные текстуры образованы скоплениями гнёзд и единичной вкрапленностью галенита. Размеры вкрапленников колеблются от со-

тых долей до нескольких миллиметров. Полосчатая и прожилково-вкрапленная текстуры представлены чередованием полос различного состава – пирит–сфалерит, кварц–сфалерит, кварц–блеклые руды, кварц, отличающихся друг от друга по густоте, форме и размерам вкрапленности рудных минералов. Мощность полос колеблется от нескольких миллиме-

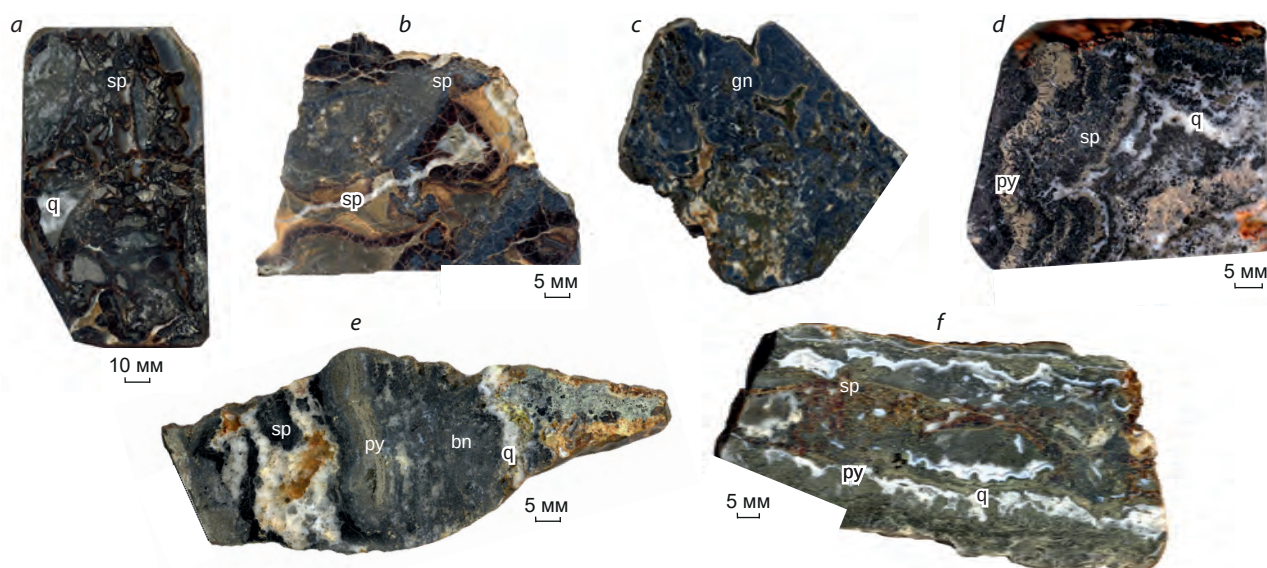


Рис. 2. Комбинированные текстуры (полированные штуфы) золото-серебро-полиметаллических руд:

a–c – брекчиевая с элементами колломорфной; *d* – брекчиевая с элементами гнездово-вкрапленной; *e* – полосчатая и прожилково-вкрапленная; *f* – крустификационно-полосчатая; *sp* – сфалерит, *py* – пирит, *gn* – галенит, *bn* – блеклые руды, *q* – кварц

Fig. 2. Combined texture types of gold-silver-polymetallic ores (polished slabs):

a–c – breccia with elements of colloform; *d* – breccia with elements of nested-disseminated; *e* – banded and vein-disseminated; *f* – crustified banded; *sp* – sphalerite, *py* – pyrite, *gn* – galena, *bn* – fahlore, *q* – quartz

тров до нескольких сантиметров. Крустификационно-полосчатая текстура образована причудливо изгибающимися полосками сфалерита, пирита, кварца. В таких крустификациях встречаются симметрично и ритмично сложенные полосы кварца различного оттенка (от серого, белого, молочного до прозрачного).

Текстуры золото-серебро-кварцевых руд: брекчиевая, прожилково-сетчатая; полосчатая с элементами брекчиевой; крустификационно-полосчатая; прожилково-вкрапленная (рис. 3). Брекчиевая, прожилково-сетчатая текстуры характеризуются наличием остроугольных обломков вмещающих пород размерами от 2–3 мм до 2–3 см и разноориентированных прожилков кварцевого, кварц-карбонатного составов; полосчатая с элементами брекчиевой представлена чередованием полос кварце-

вого, кварц-сфалеритового составов, отличающихся друг от друга мощностью и составом полос с обломками гидротермально изменённых вмещающих пород и микрокварцитов, сцементированных более поздним кварцевым агрегатом; крустификационно-полосчатая образована причудливо изгибающимися полосками кварца, карбонатов с кружевными агрегатами сфалерита, мощность полос колеблется от 1–2 мм до 2–3 см; прожилково-вкрапленная отличается сочетанием прожилковой и гнездово-вкрапленной текстур. Разноориентированные кварцевые прожилки в сочетании с единичной вкрапленностью сфалерита, как и сростания кристаллов сфалерита и кварца, погружены в кварц-карбонатный жильный субстрат.

Структуры руд кристаллически-зернистые: аллотриоморфнозернистая, гипидиомор-

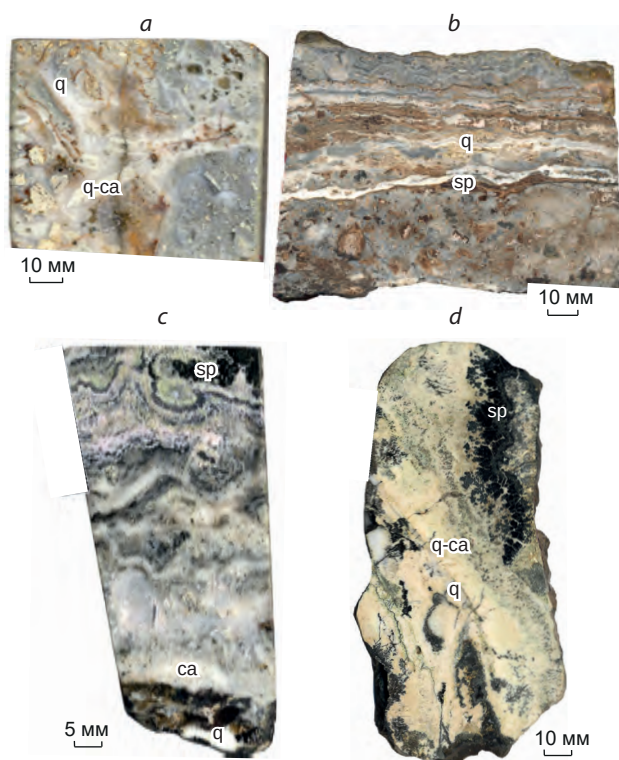


Рис. 3. Комбинированные текстуры (полированные штуды) золото-серебряных руд:

a – брекчиевая, прожилково-сетчатая; *b* – полосчатая с элементами брекчиевой; *c* – крустификационно-полосчатая; *d* – прожилково-вкрапленная; *q* – кварц, *ca* – карбонаты, *q-ca* – кварц-карбонаты, *sp* – сфалерит

Fig. 3. Combined texture types of gold-silver-polymetallic ores (polished slabs):

a – breccia, veinlet-reticulate; *b* – banded with elements of breccia; *c* – crustified banded; *d* – vein-disseminated; *q* – quartz, *ca* – carbonates, *q-ca* – quartz-carbonates, *sp* – sphalerite

фнозернистая, идиоморфная, пойкилитовая. Различия между ними обусловлены разной степенью идиоморфизма сульфидов, взаимоотношениями второстепенных и редких минералов. Встречаются эмульсионные структуры распада твёрдых растворов – микровключения халькопирита в сфалерите и галенита в блеклых рудах. Группа катакластических образует дендритную структуру. В рудах вулканогенных месторождений Курило-Камчатской островной дуги дендритовидное строение довольно типично для сульфидов и сульфосолей. Это связано с их весьма неоднородным строением в результате обогащения отдельных зон Cu, As, Ag, Sb, Fe, Mn, Te, Bi, Pb. Для Мутновского месторождения дендритовидные формы свойственны галениту, сфалериту, пириту, блеклым рудам.

Минеральный состав руд главной жильной зоны Определяющая очень разнообразен и крайне неоднороден, в большинстве случаев представлен зональными минералами при неравномерном распределении в них элемен-

тов-примесей (табл. 2). Как видно из таблицы, количество главных гипогенных минералов невелико. Их распространение в пределах жильной зоны неравномерное. Галенит, пирит, сфалерит сосредоточены главным образом на южном фланге и в центральной части месторождения. Кальцит развит на северном фланге, постоянно присутствует кварц, за исключением мест скопления сульфидов и карбонатов.

Многообразие второстепенных и редких гипогенных минералов – отличительная черта руд Мутновского месторождения. Среди них – широкий спектр минералов серебра, золота, меди, свинца, марганца, железа. Характерны сульфосоли мышьяка, сурьмы, различные теллуриды, сложные сульфоселениды висмута, минералы олова. Большая часть гипергенных минералов отнесена к северному флангу. Среди них преобладают глинистые, оксиды и гидроксиды железа и марганца, сульфаты и др. На месторождении существенно развиты сульфидные минеральные ассоциации (южный фланг жильной зоны Определяющая): пирит-



Табл. 2. Минеральный состав руд жильной зоны Определяющая (составлена с учётом данных [3, 7])

Table 2. Mineral composition of the ores in the main vein zone Opredelyayushchaya [according to 3, 7]

Минералы	Гипогенные		Гипергенные
	Рудные	Жильные	
Главные	Пирит FeS_2 , сфалерит ZnS , галенит PbS	Кварц SiO_2 , кальцит CaCO_3	Халцедон $10\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, опал $4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, каолинит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Второстепенные	Тетраэдрит $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, теннантит $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_2\text{As}_4\text{S}_{13}$, алабандин MnS , марказит FeS_2 , халькопирит CuFeS_2	Родохрозит MnCO_3 , манганокальцит MnCO_3 , анкерит $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})[\text{CO}_3]_2$	Монтмориллонит $\text{AlSi}_2\text{O}_6\text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, хлорит $(\text{Mn}, \text{Al})_6(\text{OH})_8(\text{Si}, \text{Al})_2$, ярозит $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, алунит $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, серицит $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, эпидот $\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{12}\text{OH}$, пренит $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Редкие	Голдфилдит $\text{Cu}_{12}\text{SbTe}_3\text{S}_{13}$, фрейбергит $\text{Ag}_{10}\text{Zn}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, аргентит Ag_2S , штернбергит AgFe_2S_3 , прустит Ag_3AsS_3 , пираргирит Ag_3SbS_3 , стибиопирсеит $(\text{Ag}_1\text{Cu})_{14}(\text{Ag}_1\text{Sb})_2\text{S}_{11}$, арсенполибазит $(\text{Ag}, \text{Cu})_{16}(\text{As}, \text{Sb})_2\text{S}_{11}$, энаргит Cu_3AsS_4 , люционит $\text{Cu}_3(\text{As}, \text{Sb})\text{S}_4$, фаматинит SbS_4Cu , молибденит MoS_2 , бурнонит CuPbSbS_3 , колусит $\text{Cu}_{13}\text{As}_4\text{S}_{16}$, моусонит $\text{Cu}_6\text{Fe}_2\text{SnS}_8$, станноидит $\text{Cu}_8(\text{Fe}, \text{Zn})_3\text{Sn}_2\text{S}_{12}$, канфилдит Ag_3SnS_6 , диафорит $\text{Ag}_3\text{Pb}_2\text{Sb}_3\text{S}_8$, овихиит $\text{Ag}_2\text{Pb}_5\text{Sb}_6\text{S}_{15}$, киноварь HgS , гессит Ag_2Te , алтаит PbTe , сильванит AgAuTe_4 , теллуrowисмутит Bi_2Te_3 , тетрадимит $\text{Bi}_{14}\text{Te}_{13}\text{S}_8$, самородные Au , Ag , Al , Fe , As , сульфоселениды Bi , берриит $\text{Cu}_3\text{Ag}_2\text{Pb}_3\text{Bi}_7\text{S}_{16}$, гауерит MnS_2	Родонит $(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{SiO}_3$, адуляр $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, флюорит CaF_2 , доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, магнезит MgCO_3 , сидерит FeCO_3 , барит BaSO_4 , ангидрит CaSO_4 , циркон ZrSiO_4 , апатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, цеолиты	Рутил TiO_2 , магнетит FeFe_2O_4 , пирролюзит MnO_2 , якобит MnFe_2O_4 , манганит MnOOH , ковеллин CuS , халькозин Cu_2S , англезит PbSO_4 , гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, брушит $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, пумпеллиит $\text{Ca}_2\text{MgAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

сфалерит-кварцевая; сфалерит-галенит-кварцевая; халькопирит-блеклорудная. Мало- и убогосульфидные ассоциации минералов характерны для северного фланга.

Основной акцент в данной работе сделан на изучении вещественного состава руд южного фланга месторождения. Здесь представлено наибольшее разнообразие сульфидов железа, свинца, цинка, сульфосолей сурьмы, мышьяка, серебра, теллура, теллуридов серебра и золота с кварцем.

Сульфиды – пирит, сфалерит, галенит – широко развиты среди рудных минералов (рис. 4). Пирит – самый распространённый минерал, кристаллизация которого происходила на всех этапах минералообразования. Он представлен как единичными идиоморфными кристаллами, так и дендритовидными агрегатами причудливой формы в тесных срастаниях с галенитом, сфалеритом, блеклыми рудами, кварцем. Образует пирит-сфалерит-кварцевую, сфалерит-галенит-кварцевую продуктивные

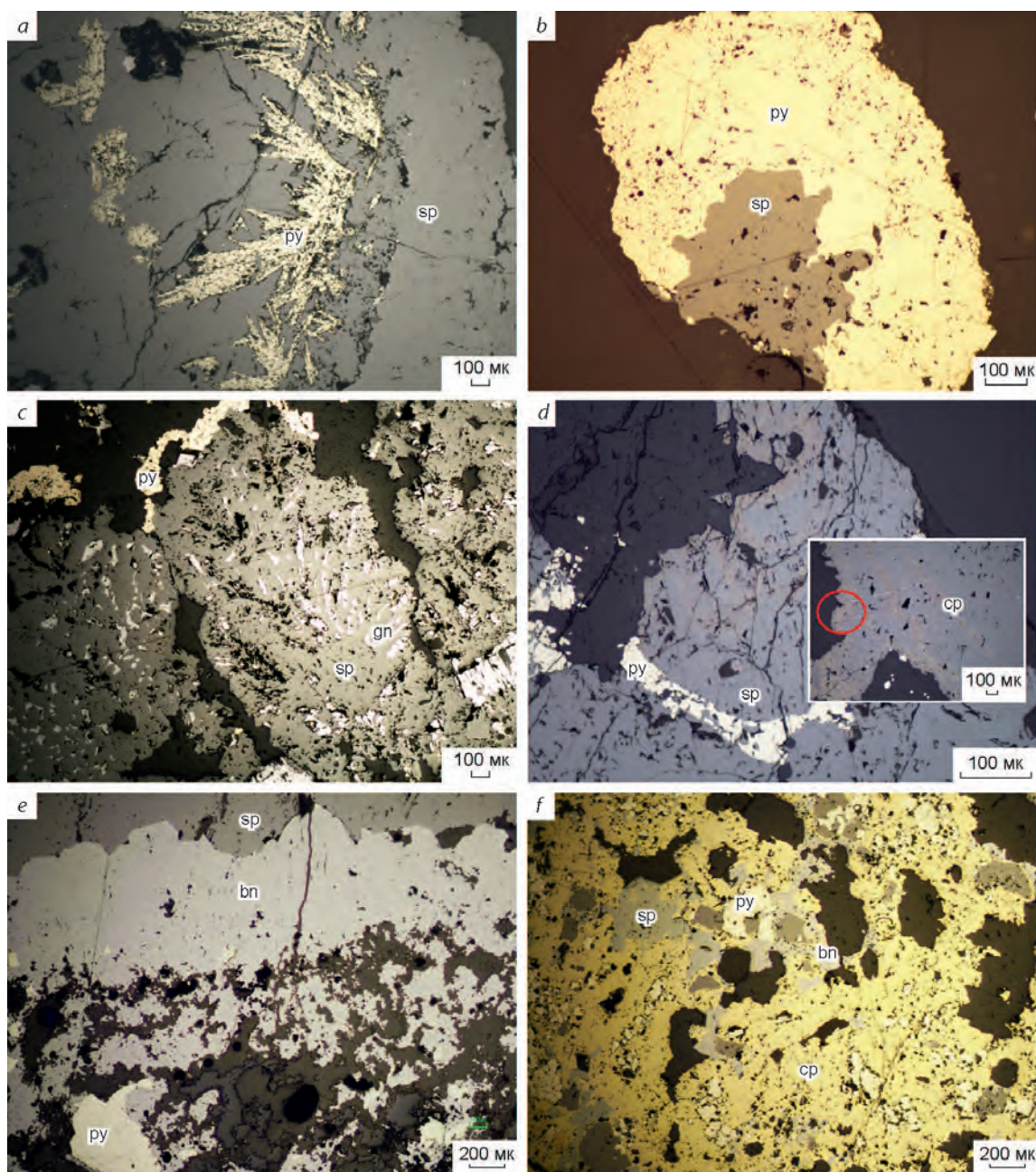


Рис. 4. Микрофотографии рудных минералов в отражённом свете:

a, b – скв. 13, интервал 188 м; *c* – скв. 13, интервал 186 м; *d* – обр. № 0928 А (*a–d* – руч. Августовский); *e* – обр. канава 158 (овраг Рудный); *f* – обр. 0101, тр. 158 (овраг Димный); sp – сфалерит, py – пирит, gn – галенит, bn – блеклые руды, cp – халькопирит

Fig. 4. Microphotographs of ore minerals in reflected light:

a, b – well 13, interval 188 m; *c* – well 13, interval 186 m; *d* – sample no 0928 A (*a–d* – Avgustovsky brook); *e* – sample no ditch 158 (Rudniy ravine); *f* – sample no 0101, tr. 158 (Dymniy ravine); sp – sphalerite, py – pyrite, gn – galena, bn – fahlore, cp – chalcopyrite



минеральные ассоциации. Отличается удивительным разнообразием форм выделения: единичные идиоморфные кристаллы размером от сотых долей до нескольких миллиметров (пирит-сфалерит-кварцевая минеральная ассоциация); дендритовые агрегаты причудливой формы в виде веточек, снежинок в кварце длиной до 10 мм, шириной от долей до 1–2 мм с галенитом, сфалеритом и блеклыми рудами (сфалерит-галенит-кварцевая минеральная ассоциация). Благодаря диагностике с использованием методов аналитической сканирующей электронной микроскопии на месторождении выявлены два вида дендритов, различающихся по микроструктуре, химическому составу и особенностям распределения химических элементов (рис. 5) [15]. Первый вид – однородные зёрна, близкие к стехиометричным, второй – неоднородные, имеющие зональное строение, подчёркивающее грани роста кристаллов и которое обусловлено локальным обогащением отдельных зон мышьяком, медью, цинком. Совместно с кварцем и сфалеритом пирит образует скопления в форме линз, гнёзд, прожилков, тем самым слагая колломорфно-полосчатые агрегаты.

По особенностям химического состава установлены две разновидности минералов: стехиометричные и неоднородные, содержащие примесь As (до 19,58 %, табл. 3). У отдельных кристаллов пирита и их сростаний отмечается неоднородная зональность по граням роста, у дендритовидных образований – облачная неоднородность, часто по краевым частям. Химическая неоднородность обусловлена локальным обогащением отдельных зон такими элементами-примесями, как As (до 19,58 %), Cu (до 4,98 %), Zn (до 4,75 %) (см. табл. 3). Методом LA-ICP-MS были определены концентрации изотопов V 51, Co 59, Ni 60, Se 77, Te 125, In 115, что ниже предела обнаружения, и подтверждено наличие примесей As, Cu, Zn (704,9–18 743, 47,5–2242,8, от 2,6–1164,1 ppm соответственно), диагностированных ранее с помощью сканирующего электронного микроскопа. Впервые зафиксированы такие элементы-примеси, как Mn (до 152,2 ppm), Sb (до 287,3), Cd (до 40,6), Au (до 11,7), Ag (до 347,1 ppm) [6].

Пересчёт на формульные единицы результатов химических анализов пирита показал небольшие отклонения от стехиометрии. В отдельных случаях наблюдается дефицит серы.

Сфалерит – второй по распространённости рудный минерал. Он отличается разнообразными формами выделения: встречается в виде единичных кристаллов, скоплений разномикронных агрегатов при размерах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров в сростании с блеклыми рудами, пиритом, галенитом, а также мономинеральных прожилок и линз мощностью от десятых долей миллиметра до 1–3 см. Макроскопически сфалерит имеет различные оттенки коричневого цвета – от светлого зеленоватого до тёмного. Таким образом, для него характерна структура выделений либо однородная, либо более сложная. Зональное строение часто связано с ориентированной эмульсионной вкрапленностью халькопирита (структура распада твёрдых растворов). Кроме халькопирита, обнаружена вкрапленность блеклых руд, пирита, кварца в кристаллах сфалерита. Как и пирит с галенитом, сфалерит стремится к образованию дендритов, которые отличаются сложным строением, обусловленным сочетанием почковидных агрегатов. Их раскристаллизация приводит к появлению микродендритов и собственно дендритов.

Данный минерал встречается во всех трёх продуктивных ассоциациях, но в большей степени образует пирит-сфалерит-кварцевую и сфалерит-галенит-кварцевую. Для сфалерита пирит-сфалерит-кварцевой ассоциации характерно многообразие взаимоотношений с пиритом, что приводит к появлению колломорфно-полосчатых агрегатов. Также часто корродируется кварцем, сечётся прожилками блеклых руд, галенита, халькопирита. Сфалерит вместе с галенитом корродирует пирит, при этом разъедается более поздним кварцем, образуя сфалерит-галенит-кварцевую минеральную ассоциацию. Часто сечётся прожилками блеклых руд, халькопирита. В пределах халькопирит-блеклорудной минеральной ассоциации сфалерит наблюдается в виде почковидных агрегатов, содержит включения га-

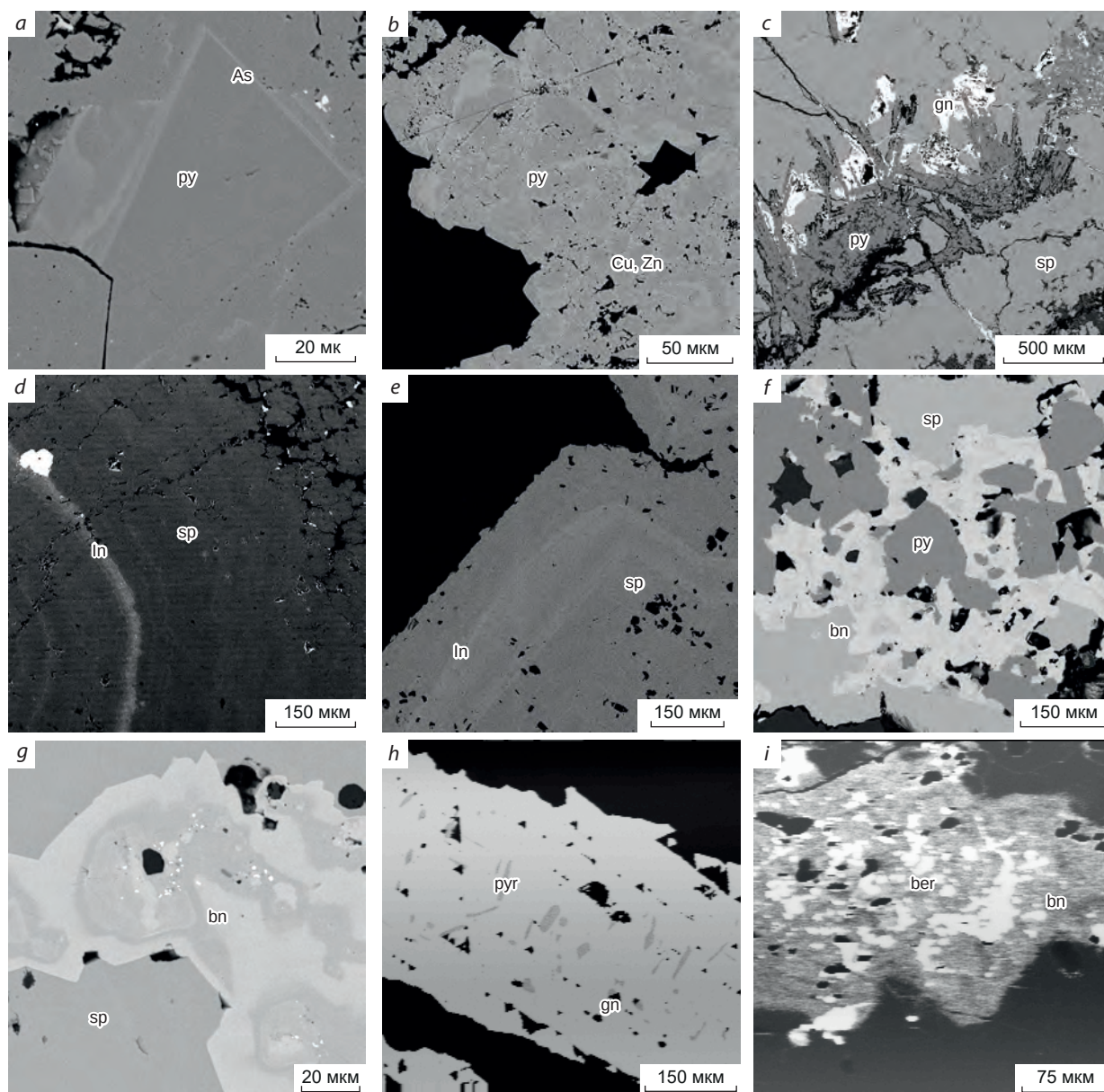


Рис. 5. Неоднородное по химическому составу строение и взаимоотношение рудных минералов:

a–c – пирит (py); *d, e* – сфалерит (sp). Светлые зоны обогащены As, Cu, Zn (py), In (sp). *f, g* – блеклые руды; *h* – галенит (gn), пираргирит (pyr); *i* – берриит (ber); *a–g* – изображения BSE SEM (SEM Tescan Vega); *h, i* – изображения в обратнорассеянных электронах (Camebax)

Fig. 5. Inhomogeneous in chemical composition structure and relationship of ore minerals:

a–c – pyrite (py); *d, e* – sphalerite (sp). Light zones are enriched in As, Cu, Zn (py), In (sp). *f, g* – fahlore; *h* – galena (gn); pyrrargyrite (pyr); *i* – berryite (ber). *a–g* – BSE SEM images (SEM Tescan Vega); *h, i* – backscattered electron images (Camebax)

**Табл. 3. Представительные микрозондовые анализы пирита, %****Table 3. Representative analyses of chemical composition of pyrite, wt %**

Образцы	Fe	S	As	Zn	Cu	Σ	Кристаллохимические формулы
1	46,12	50,00	6,76	0,00	0,00	102,88	$(\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{0,11})_{1,11}\text{S}_{1,89}$
2	46,03	43,56	12,00	0,00	0,00	101,59	$(\text{Fe}_{1,06}\text{As}_{0,21})_{1,26}\text{S}_{1,74}$
3	43,60	43,92	14,87	0,00	0,00	102,39	$(\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{0,25})_{1,25}\text{S}_{1,75}$
4	33,28	54,92	11,73	0,00	0,00	99,93	$(\text{Fe}_{0,73}\text{As}_{0,19})_{0,92}\text{S}_{2,08}$
5	41,38	39,21	19,58	0,00	0,00	100,17	$(\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{0,35})_{1,35}\text{S}_{1,65}$
6	51,69	46,35	3,83	0,00	0,00	101,87	$(\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{0,06})_{1,06}\text{S}_{1,94}$
7	42,80	48,87	0,00	4,75	2,33	98,74	$(\text{Fe}_{0,96}\text{Zn}_{0,09}\text{Cu}_{0,05})_{1,10}\text{S}_{1,91}$
8	40,68	47,87	4,08	0,71	4,98	98,32	$(\text{Fe}_{0,92}\text{As}_{0,07}\text{Zn}_{0,01}\text{Cu}_{0,10})_{1,11}\text{S}_{1,89}$

ленита, пирита, корродируется кварцем. Образуется полосчатые агрегаты совместно с блеклыми рудами, пиритом, халькопиритом.

Химический состав минерала (табл. 4) представлен широким спектром элементов-примесей, таких как Fe, Mn, Cd, In, Cu, Ge, Ga, Sn. Как правило, они распределены в пределах зёрен сфалерита неравномерно, образуя локальные зоны, обогащённые Fe до 13,23, Mn до 2,27, Cd до 2,93, In до 5,35, Cu до 10,02 %. Остальные элементы-примеси встречаются в единичных случаях при концентрациях, не превышающих 0,4–0,5 %.

По наличию железа выделены две разновидности: безжелезистая (клеюфан) и мало-железистая (Fe от 0,10 до 13,23 %). В пределах одного штуфа могут присутствовать обе разновидности: одна с высоким содержанием Fe и отсутствием Cd, другая – зональный сфалерит с наличием Fe и Mn, совместно с Cd и In. Для мало-железистой разновидности сфалерита характерно практически полное отсутствие других элементов-примесей, за исключением Cu (до 10,02 %). Пересчёт результатов химического состава на кристаллохимические формулы показал отклонения от стехиометрии (см. табл. 4). Некоторые разновидности отличаются избытком серы.

Галенит – третий по распространённости рудный минерал. Представлен единичными обособлениями, близкими к идиоморфным, формирует неправильные ксеноморфные выделения размером от сотых долей миллиметра до 0,5 см в кварце, колломорфно-полосчатые агрегаты со сфалеритом, гнезда и прожилки мощностью до 5–10 мм. Отчётливо наблюдаются треугольники выкрашивания. Встречается в основном в галенит-сфалерит-кварцевой минеральной ассоциации, значительно реже в других ассоциациях. Характерно наличие мелких включений блеклых руд, сульфосолой серебра. Дендритовидные формы минерала установлены в полиметаллических рудах, где он образует крупные обособления в форме вытянутых игл. При исследованиях с помощью ЕМРА в режиме «обратнорассеянные электроны» в них прослежены своеобразные ламели, сложенные нестабильными под пучком электронов серебряными сульфосолями типа пираргирита (Ag_2SbS_3), в которых концентрация Ag достигает 57,38 %, а Sb – 28,05 %. Также в качестве элемента-примеси присутствует Bi до 3,5 % (см. рис. 5).

Блеклые руды относятся к наиболее интересному минеральному сообществу, определяющему специфику месторождения. Их

Табл. 4. Представительные микрозондовые анализы сфалерита, %

Table 4. Representative analyses of chemical composition of sphalerite, wt %

Образцы	S	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	In	Σ	Кристаллохимические формулы
1	33,10	0,00	0,00	0,72	63,64	2,77	0,85	101,07	$(\text{Zn}_{0,95}\text{Cd}_{0,02}\text{Cu}_{0,01}\text{In}_{0,01})_{0,99}\text{S}_{1,01}$
2	33,65	0,00	0,00	0,00	63,95	2,93	1,21	101,74	$(\text{Zn}_{0,95}\text{Cd}_{0,03}\text{In}_{0,01})_{0,98}\text{S}_{1,02}$
3	32,46	0,00	2,44	2,48	59,45	0,00	4,19	101,02	$(\text{Zn}_{0,89}\text{Fe}_{0,04}\text{Cu}_{0,04}\text{In}_{0,04})_{1,01}\text{S}_{0,99}$
4	32,14	0,00	1,72	3,79	57,66	0,00	5,35	100,66	$(\text{Zn}_{0,87}\text{Fe}_{0,03}\text{Cu}_{0,06}\text{In}_{0,05})_{1,01}\text{S}_{0,99}$
5	33,03	0,00	2,28	2,71	58,47	1,15	4,74	102,37	$(\text{Zn}_{0,87}\text{Fe}_{0,04}\text{Cd}_{0,01}\text{Cu}_{0,04}\text{In}_{0,04})_{1,00}\text{S}_{1,00}$
6	32,85	1,45	1,45	0,00	64,11	0,87	0,00	100,74	$(\text{Zn}_{0,95}\text{Mn}_{0,03}\text{Fe}_{0,03}\text{Cd}_{0,01})_{1,01}\text{S}_{0,99}$
7	33,75	2,27	2,41	0,00	60,89	0,09	0,00	99,41	$(\text{Zn}_{0,90}\text{Mn}_{0,04}\text{Fe}_{0,04})_{0,98}\text{S}_{1,02}$
8	33,85	0,74	10,57	10,02	44,83	0,00	0,00	100,01	$(\text{Zn}_{0,65}\text{Mn}_{0,01}\text{Fe}_{0,18}\text{Cu}_{0,15})_{1,00}\text{S}_{1,00}$
9	33,71	0,75	10,12	9,88	45,14	0,00	0,00	99,60	$(\text{Zn}_{0,66}\text{Mn}_{0,01}\text{Fe}_{0,17}\text{Cu}_{0,15})_{0,99}\text{S}_{1,01}$
10	34,19	0,00	13,23	3,81	49,22	0,00	0,00	100,45	$(\text{Zn}_{0,71}\text{Fe}_{0,22}\text{Cu}_{0,06})_{0,99}\text{S}_{1,01}$
11	33,76	0,00	9,15	4,00	53,15	0,00	0,00	100,06	$(\text{Zn}_{0,78}\text{Fe}_{0,16}\text{Cu}_{0,06})_{0,99}\text{S}_{1,01}$
12	33,18	0,25	11,26	2,77	51,01	0,00	0,00	98,47	$(\text{Zn}_{0,76}\text{Fe}_{0,20}\text{Cu}_{0,04})_{1,00}\text{S}_{1,00}$

Примечание. Здесь и в табл. 5 анализы выполнены в лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН (SEM Tescan Vega).

формы выделения, особенности строения, вариации химического состава, элементы-примеси крайне разнообразны. Они встречаются от мелких включений, тонких прожилок, кайм и неправильных сростаний (1–100 мкм) до крупных обособлений в виде полос, линз мощностью 10–15 мм. Формы зёрен от простых изометрических, овальных до более сложных изогнутых. Часто отмечаются хорошо образованные кристаллы. Впервые на месторождении были обнаружены дендриты, сложенные блеклой рудой. Представлены преимущественно двумя фазовыми разновидностями: сростания блеклой руды с сульфоселенидами Pb, Bi, Ag и блеклые руды, содержащие Te и Bi.

Блеклые руды входят в группу второстепенных и редких минералов, но тем не менее наблюдаются во всех минеральных ассоциациях. Обычно они распространены в виде сплошных масс или вкрапленников в жильной и вмещающей породе с галенитом, сфалеритом, пиритом, халькопиритом. В некоторых случаях образуют более крупные скопления совместно со сфалеритом и кварцем. Реже находятся в пустотах кварца или его интерсти-

циях. Кроме того, ассоциируют со многими редкими минералами (теллуридами серебра, свинца, золота, серебра, пруститом, пираргиритом, сульфоселенидами, сложными сульфовисмутитами).

В отражённом свете они отличаются от тенками серого цвета (от зеленовато-серого до розово-серого). С помощью методов сканирующей электронной микроскопии выявлено неоднородное строение в виде мозаично-пятнистых и зональных обособлений с участием нескольких микрофаз, различающихся интенсивностью (см. рис. 5). Вероятно, причиной неоднородности можно считать распад твёрдых растворов при изменении термодинамических условий в процессе минералоотложения [12].

Совместно со сфалеритом, халькопиритом и кварцем блеклые руды образуют халькопирит-блеклорудную минеральную ассоциацию, частично – галенит-сфалерит-кварцевую.

Согласно классификации, предложенной Н. Н. Мозговой, А. И. Цепиным, нами приведено несколько минеральных видов, меж- и внутривидовых разновидностей блеклых руд [12] (табл. 5). Выделено несколько минераль-



ных видов: теннантит (As до 3,95 формульных единиц, далее ф. ед.), тетраэдрит (Sb до 4,11 ф. ед.) и промежуточные члены – теннантит-тетраэдрит. При этом существенно преобладают теннантит и теннантит-тетраэдрит с повышенными концентрациями As (до 2,53 ф. ед.). К внутривидовым отнесены Zn-теннантиты, Ag-теннантиты, Zn-тетраэдриты, Zn-теннантит-тетраэдриты, Ag-содержащие Zn-теннантиты, Ag-содержащие Zn-тетраэдриты, Ag-содержащие Zn-теннантит-тетраэдриты, аннивит-Zn-теннантиты, Te-содержащие Zn-теннантиты, Bi-Te-содержащие Zn-теннантиты, Te-содержащие теннантит-тетраэдриты, голдфилдит-теннантит-тетраэдриты.

Широкие вариации концентраций цинка (до 9,24 %, или до 2,20 ф. ед.) – одна из характерных особенностей блеклых руд месторождения. Повсеместно присутствует железо, но его содержание не превышает 4,37 %, что соответствует 1,26 ф. ед. Максимальные значения обнаружены в Ag-теннантитах.

Другая важная особенность – присутствие серебра. Выделены две разновидности: малосеребряные (от 0,00 до 1,86 %, или 0,00 до 0,28 ф. ед.) в теннантит-тетраэдритах и высокосеребряные (до 20,26 %, или 3,06 ф. ед.) в теннантитах и тетраэдритах. Следует отметить Ag-теннантиты – довольно редкий представитель среди этого минерального сообщества. Наиболее высокие концентрации серебра (более 20 %) образуют особый вид – фрейбергит в виде мелких включений в галените. Обогащённые серебром разности чаще всего содержат и повышенные концентрации цинка.

Zn-теннантиты и Zn-теннантит-тетраэдриты содержат висмут и теллур. Данные разновидности обладают неоднородным строением, при этом тёмные фазы – Zn-теннантиты или Zn-теннантит-тетраэдриты – содержат незначительные количества теллура или висмута, а наиболее светлым участкам соответствуют голдфилдит-теннантит-тетраэдриты в виде мелких включений в сфалерите с содержанием Te 17,38 %, или 2,16 ф. ед. Особенности высокотеллуристых блеклых руд – небольшое количество Zn и Fe и полное отсутствие Ag. В сростании с голдфилдит-теннантит-тетра-

эдритами установлены аннивит-теннантиты (Bi > 0,66, As + Sb > 3 ф. ед., по [12]). Для минералов характерны значительные содержания цинка (8,29 %, или 1,95 ф. ед.), и по существу они названы аннивит-Zn-теннантитами. Ранее в голдфилдит-теннантит-тетраэдритах изученного месторождения была обнаружена примесь Se до 2,3 % [13].

Из редко встречающихся элементов в составе исследуемых блеклых руд присутствует магний в количестве, не превышающем 0,65 %, или 0,22 ф. ед. Он фиксируется повсеместно во всех трёх разновидностях, но больше всего в тетраэдритах.

Халькопирит также относится в группе второстепенных минералов. Он образует неправильные формы (от десятых долей до 10–15 мм) и тонкие прожилки в ассоциациях с блеклыми рудами и кварцем. Совместно с пиритом встречается в виде мелких включений в нём. Повсеместно образует эмульсионную вкрапленность в сфалерите. В некоторых случаях замещается ковеллином. Каких-либо элементов-примесей при исследовании его химического состава на уровне чувствительности микронзондового анализа не найдено.

Теллуриды представлены гесситом, алтаитом, сильванитом, теллуrowисмутитом, тетрадимитом. Обнаружены в пределах халькопирит-блеклорудной ассоциации. Алтаит, гессит, как правило, – включения неправильной формы (до десятых долей миллиметра) в блеклых рудах. Часто ассоциируют с халькопиритом, реже галенитом. Совместно с кварцем образуют интерстиции. Сильванит присутствует в виде незначительных ксеноморфных выделений (сотые доли миллиметра до 0,5 мм) в сростании с гесситом в блеклых рудах. Мелкие включения теллуrowисмутита и тетрадимита (тысячные – сотые доли миллиметра) определены в голдфилдитах. Форма включений вытянутая, неправильная, редко изометрическая.

Самородное золото месторождения наиболее часто встречается в рудах северного фланга, а также отмечено на южном фланге, хотя и в значительно меньшем количестве. Обладает сложной дендритовидной формой,

Табл. 5. Представительные микрозондовые анализы блеклых руд, %

Table 5. Representative analyses of chemical composition of tennantite-tetrahedrite group minerals, wt %

Образцы	As	Sb	Cu	S	Fe	Zn	Ag	Mn	Te	Bi	Сумма
<i>Теннантит</i>											
1	20,52	0,00	44,01	29,00	1,38	7,06	0,00	0,50	0,00	0,00	102,47
2	15,91	0,61	26,91	26,11	4,37	5,00	20,26	0,00	0,00	0,00	99,17
3	13,15	9,62	40,79	27,48	0,65	7,57	1,13	0,46	0,00	0,00	100,85
4	13,62	7,24	41,95	27,60	0,00	7,72	0,00	0,00	0,00	4,22	102,35
5	16,09	6,10	43,36	27,77	0,62	7,93	0,00	0,00	1,10	0,00	102,97
6	15,62	4,28	42,16	27,63	0,78	7,37	0,00	0,00	0,74	4,20	102,78
<i>Тетраэдрит</i>											
7	6,75	20,27	39,44	26,64	1,20	7,76	0,00	0,39	0,00	0,00	102,45
8	0,00	27,34	25,1	23,08	0,55	5,34	15,25	0,65	0,00	0,00	97,31
9	0,00	27,47	25,63	23,3	0,63	5,31	15,91	0,66	0,00	0,00	98,91
<i>Теннантит-тетраэдрит</i>											
10	12,50	12,33	41,82	27,36	0,69	7,11	0,00	0,47	0,00	0,00	102,28
11	11,19	12,12	39,79	27,05	0,50	7,63	1,34	0,42	0,00	0,00	100,04
12	7,85	17,72	38,62	26,21	0,68	6,78	2,20	0,60	0,00	0,00	100,66
13	9,45	4,47	46,11	26,42	0,00	3,03	0,00	0,00	12,39	0,00	101,87
14	8,81	3,55	46,27	26,47	0,41	2,66	0,00	0,00	11,95	0,00	100,12
15	6,68	4,67	46,91	25,90	0,00	1,16	0,00	0,00	16,02	0,00	101,34
16	6,88	1,71	47,70	26,35	0,00	1,11	0,00	0,00	17,38	0,00	101,13
17	7,81	3,14	46,17	26,65	0,65	2,00	0,00	0,00	14,64	0,00	101,06

имеет мелкие размеры 0,01–0,15 мм (максимальные до 1,00 мм). Характеризуется неоднородным строением с концентрациями Ag от 29,50 до 41,55 %, отличается появлением в виде элемента-примеси Hg до 2,5–3,0 %.

Впервые в рудах с помощью электронного микроанализатора диагностирован минерал из группы сульфосолей, содержащий висмут, селен и серебро. Изучение агрегатных сростаний показало, что им присуще неоднородное зональное строение (см. рис. 5). Светлые зоны представлены фазой, близкой к беррииту ($\text{Ag}_{1,5}\text{Cu}_{3,5}\text{Pb}_3\text{Bi}_7\text{S}_{16}$), с высокими содержаниями Se (до 4,00 %), тёмные – голдфилдит-теннантит-тетраэдритом.

Среди жильных минералов наиболее распространён кварц. Он образует зёрна размером от 0,01 мм, их агрегаты до 1 мм и более

крупные кристаллы 3–5 мм. Макроскопически обладает серовато-белым, светло-серым, серым до молочного цветами, трещиноватый. Характеризуется аллотриоморфнозернистой и гипидиоморфнозернистой структурами. Встречается в ассоциациях с пиритом, сфалеритом, галенитом. Наиболее распространён в рудах северного фланга.

Гипергенные минералы развиты в основном на северном фланге рудоносной зоны Определяющая. Ковеллин, халькозин, англезит находятся повсеместно в ассоциации с галенитом, сфалеритом, реже блеклыми рудами, образуют мелкие неправильные выделения (0,01–0,03 мм), каймы, оторочки.

Для оценки температур и концентраций гидротермальных минералообразующих растворов применялись методы термобарогеохи-



Кристаллохимические формулы	Минеральные виды и разновидности
<i>Теннантит</i>	
$[\text{Cu}^{+}_{9,98}(\text{Zn}_{1,56}\text{Fe}_{0,36})_{1,91}]_{11,89}(\text{As}_{3,95}\text{Mn}_{0,12})_{4,07}\text{S}_{13,03}$	Zn-теннантит
$[(\text{Cu}^{+}_{6,77}\text{Ag}_{3,06})_{9,83}(\text{Zn}_{1,29}\text{Fe}_{1,26})_{2,55}]_{12,38}(\text{Sb}_{0,16}\text{As}_{3,38})_{3,54}\text{S}_{13,12}$	Ag-теннантит (фрейбергит)
$[(\text{Cu}^{+}_{9,80}\text{Ag}_{0,16})_{9,96}(\text{Zn}_{1,77}\text{Fe}_{0,18})_{1,95}]_{11,91}(\text{Sb}_{1,21}\text{As}_{2,68}\text{Mn}_{0,12})_{4,00}\text{S}_{13,08}$	Ag-содержащий Zn-теннантит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{0,07}\text{Zn}_{1,80})_{1,87}]_{11,87}(\text{Sb}_{0,91}\text{As}_{2,77}\text{Bi}_{0,31})_{3,99}\text{S}_{13,14}$	Аннивит-Zn-теннантит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{0,12}\text{Zn}_{1,80}\text{Fe}_{0,16})_{2,09}]_{12,09}(\text{Sb}_{0,74}\text{As}_{3,19}\text{Te}_{0,13})_{4,06}\text{S}_{12,85}$	Te-содержащий Zn-теннантит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{0,01}\text{Zn}_{1,70}\text{Fe}_{0,21})_{1,92}]_{11,92}(\text{Sb}_{0,53}\text{As}_{3,15}\text{Te}_{0,09}\text{Bi}_{0,30})_{4,07}\text{S}_{13,01}$	Bi-Te-содержащий Zn-теннантит
<i>Тетраэдрит</i>	
$[\text{Cu}^{+}_{9,70}(\text{Zn}_{1,86}\text{Fe}_{0,34})_{2,19}]_{11,89}(\text{Sb}_{2,60}\text{As}_{1,41}\text{Mn}_{0,09})_{4,10}\text{S}_{12,99}$	Zn-тетраэдрит
$[(\text{Cu}^{+}_{7,23}\text{Ag}_{2,59})_{9,82}(\text{Zn}_{1,50}\text{Fe}_{0,18})_{1,68}]_{11,49}(\text{Sb}_{4,11}\text{Mn}_{0,22})_{4,33}\text{S}_{13,18}$	Ag-содержащий Zn-тетраэдрит
$[(\text{Cu}^{+}_{7,23}\text{Ag}_{2,59})_{9,82}(\text{Zn}_{1,50}\text{Fe}_{0,18})_{1,68}]_{11,49}(\text{Sb}_{4,11}\text{Mn}_{0,22})_{4,33}\text{S}_{13,18}$	Ag-содержащий Zn-тетраэдрит
<i>Теннантит-тетраэдрит</i>	
$[\text{Cu}^{+}_{9,99}(\text{Zn}_{1,65}\text{Fe}_{0,19})_{1,84}]_{11,83}(\text{Sb}_{1,54}\text{As}_{2,53}\text{Mn}_{0,16})_{4,23}\text{S}_{12,96}$	Zn-теннантит-тетраэдрит
$[(\text{Cu}^{+}_{9,74}\text{Ag}_{0,19})_{9,93}(\text{Zn}_{1,82}\text{Fe}_{0,14})_{1,95}]_{11,69}(\text{Sb}_{1,55}\text{As}_{2,32}\text{Mn}_{0,12})_{3,99}\text{S}_{13,12}$	Ag-содержащий Zn-теннантит-тетраэдрит
$[(\text{Cu}^{+}_{9,67}\text{Ag}_{0,32})_{9,99}(\text{Zn}_{1,65}\text{Fe}_{0,19})_{1,84}]_{11,51}(\text{Sb}_{2,32}\text{As}_{1,67}\text{Mn}_{0,22})_{4,21}\text{S}_{13,01}$	Ag-содержащий Zn-теннантит-тетраэдрит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{1,34}\text{Zn}_{0,72})_{2,09}]_{12,06}(\text{Sb}_{0,57}\text{As}_{1,97}\text{Te}_{1,52})_{4,06}\text{S}_{12,88}$	Te-содержащий теннантит-тетраэдрит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{1,46}\text{Zn}_{0,64}\text{Fe}_{0,12})_{2,06}]_{12,22}(\text{Sb}_{0,46}\text{As}_{1,85}\text{Te}_{1,47})_{3,78}\text{S}_{13,00}$	Te-содержащий теннантит-тетраэдрит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{1,78}\text{Zn}_{0,28})_{2,18}]_{12,18}(\text{Sb}_{0,52}\text{As}_{1,95}\text{Te}_{1,43})_{3,89}\text{S}_{12,93}$	Голдфилдит-теннантит-тетраэдрит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{1,88}\text{Zn}_{0,27})_{2,15}]_{12,15}(\text{Sb}_{0,22}\text{As}_{1,45}\text{Te}_{2,16})_{3,83}\text{S}_{13,01}$	Голдфилдит-теннантит-тетраэдрит
$[\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{2+}_{1,42}\text{Zn}_{0,48}\text{Fe}_{0,18})_{2,08}]_{12,08}(\text{Sb}_{0,41}\text{As}_{1,64}\text{Te}_{1,80})_{3,85}\text{S}_{13,07}$	Голдфилдит-теннантит-тетраэдрит

мии. По результатам оптических исследований наибольшее количество газовой-жидких включений содержится в хорошо раскристаллизованном кварце и сфалерите. Среди них выделены первичные, вторичные и мнимо вторичные [5]. Первичным включениям свойственны простые формы, удлинённые, эллипсоидные с чёткими контурами. Вторичные и мнимо вторичные имеют более сложные формы, расшнурованные, располагаются преимущественно вдоль трещин. По фазовому составу это двухфазные газовой-жидкие включения с непостоянным объёмом газовой фазы от 10 до 80 %, в среднем 25–30 %.

Прозрачные кристаллы кварца содержат первичные газовой-жидкие включения размером не более 1–2 мк с объёмом газовой фазы 60–80 %. Они часто приурочены к плоскостям

кристаллов кварца. Встречаются также и более сложные включения с нечёткими контурами, негативной формы. Вторичные и мнимо вторичные развиты в микротрещинах кристаллов кварца. Отличаются сложной структурной позицией и морфологией.

Первичные включения в сфалерите имеют крупные размеры до 10 мк. Они удлинённые сферической формы с чёткими контурами. По составу двухфазные. Объём газовой фазы до 40–50 %.

Температура гомогенизации включений лежит в пределах 200–350 °С. В кварце варьирует от 330–350 до 270–150, сфалерите – от 260 до 200 °С.

Мутновское золото-серебро-полиметаллическое месторождение считается одним из перспективных вулканогенных рудных объектов

Южной Камчатки. На южном фланге месторождения распространён сульфидно-полиметаллический тип руд, на северном – золото-серебряный. Марганцевые, марганец-кварц-карбонатные руды развиты повсеместно. Текстуры руд комбинированные: с преобладанием брекчиевой с элементами колломорфной; гнездово-вкрапленной; полосчатой и прожилково-вкрапленной; крустификационно-полосчатой, прожилково-сетчатой, полосчатой с элементами брекчиевой; крустификационно-полосчатой; прожилково-вкрапленной.

Текстурно-структурные анализы руд свидетельствуют о метасоматическом замещении рудовмещающих пород и жильном заполнении трещин.

В строении рудных тел южного фланга жильной зоны Определяющая участвуют пирит-сфалерит-кварцевая, сфалерит-галенит-кварцевая, халькопирит-блеклорудная минеральные ассоциации. Руды отличаются сложным составом с преобладанием зональных минералов при неравномерном распределении элементов-примесей в них. Повышенное содержание сульфидов и обилие второстепенных и редких рудных минералов – отличительная особенность месторождения. Наиболее распространены сульфиды – пирит, сфалерит, галенит; из жильных минералов – кварц. Среди второстепенных и редких минералов установлены: блеклые руды, халькопирит, теллуриды Au, Ag, Pb, Bi, самородное золото, сульфосоли Bi, Se, Ag. Важные в промышленном отношении химические элементы присутствуют в собственной минеральной форме и в виде элементов-примесей. Так, для Au, Ag – самородное золото, гессит, сильванит, фрейбергит, берриит; Te – голдфилдит, гессит, алтаит, сильванит, теллуrowисмутит, тетрадимит; Cu – халькопирит, пирит, сфалерит,

берриит, халькозин, ковеллин; Zn – сфалерит, Zn-содержащие блеклые руды, пирит; Pb – галенит, алтаит, берриит; In – сфалерит; Cd – сфалерит; As – пирит; Hg – самородное золото; Se – берриит; Bi – Bi-содержащие блеклые руды, теллуrowисмутит, тетрадимит, берриит.

В продуктивном кварце и сфалерите обнаружены газово-жидкие включения с температурами гомогенизации от 200 до 350 °C.

Мутновское золото-серебро-полиметаллическое месторождение относится к вулканогенным полихронным и полигенным объектам, сформировавшимся в условиях небольших глубин. Текстурно-структурные особенности, необычное разнообразие минерального состава и форм нахождения рудообразующих элементов, повышенное содержание сульфидов, обилие редких минералов, присутствие главных ценных компонентов в форме собственных минералов и в виде элементов-примесей говорят о сложном многостадийном процессе формирования месторождения, которое продолжается и по сегодняшний день.

Полученные данные можно использовать в качестве критериев в ходе проведения возможных геологоразведочных работ на месторождении и для дальнейшего его изучения.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН В. В. Куликову, А. А. Платонову за помощь в подготовке, обработке каменного материала, изготовлении полированных шлифов и ашлифов, Р. Н. Куликовой – пластинок, Аналитического центра ИВиС ДВО РАН Н. И. Чебровой и А. О. Садовниковой, АСИЦ ИПТМ РАН В. К. Карандашеву – за выполнение аналитических работ, рецензентам – за важные и ценные рекомендации.

Список литературы

1. Артюхов В. Р., Бушуев А. С. Отчет о результатах геологических работ на Мутновском золото-серебряном месторождении (1-й этап) с под-

счетом запасов по состоянию на 01.10.2005 года и технико-экономическим обоснованием временных кондиций. Книга 1. – Петропавловск-



- Камчатский : Министерство природных ресурсов РФ ; СТЕППС ИСТ; Камчатгеология, 2005. – 131 с.
2. Василевский М. М. Вулканогенно-рудные пояса и центры // Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций. – М. : Недра, 1977. – С. 86–95.
 3. Влодавец В. И. Начало // Бюллетень вулканологических станций. – 1974. – № 50. – С. 39.
 4. Декусар З. Б., Семина Л. П., Спиченкова М. В. Отчет о гидрогеологических исследованиях масштаба 1 : 200 000, проведенных на территории листов N-57-XXXIII в 1971–1973 гг. – Петропавловск-Камчатский : ПГО «Камчатгеология», 1977. – 293 с.
 5. Ермаков Н. П., Долгов Ю. А. Термобарогеохимия. – М. : Недра, 1979. – 271 с.
 6. Зобенько О. А., Абрамова В. Д., Округин В. М., Философова Т. М., Яблокова Д. А. Элементы-примеси в пирите Мутновского Au-Ag-полиметаллического месторождения (Южная Камчатка) по данным LA-ICP-MS // Новое в познании процессов рудообразования: Восьмая Российская молодёжная научно-практическая Школа, Москва, 26–30 ноября 2018 г. – Сборник материалов. – М. : ИГЕМ РАН, 2018. – С. 156–159.
 7. Игнатъев Е. К., Лезин В. И. Пояснительная записка к технологическим пробам Мутновского месторождения (Южная Камчатка). – Камчатская область, пос. Мильково : ГПП ЦКГЭ «Камчатгеология», 1992. – 34 с.
 8. Краткая объяснительная записка. Каталог месторождений, проявлений, пунктов минерализаций и ореолов рассеяния полезных ископаемых. Карта полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1 : 500 000 / гл. ред. А. Ф. Литвинов, М. Г. Патока, Б. А. Марковский. – Петропавловск-Камчатский : СП КФ ВСЕГЕИ, 1999. – 520 с.
 9. Лоншаков Е. А. Кайнозойские вулканогенные и вулканогенно-осадочные формации Южной Камчатки // Тихоокеанская геология. – 1982. – № 6. – С. 94–97.
 10. Лоншаков Е. А. Ряды вулканотектонических структур и структурно-вещественные парагенезисы Южно-Камчатского района // Бюллетень вулканологических станций. – 1979. – № 57. – С. 79–81.
 11. Лоншаков Е. А., Бархатов Ю. В., Олейник В. И. Геологическое строение и полезные ископаемые Юго-Восточной Камчатки // Отчет Гореловской партии ПГТС м-ба 1 : 50 000 по работам 1974–1979 гг. в 4 томах. Том I, книга 2. Полезные ископаемые. – Петропавловск-Камчатский : МГ РСФСР КТГУ ГЭ, 1979. – 287 с.
 12. Мозгова Н. Н., Цепин А. И. Блеклые руды (особенности химического состава и свойств). – М. : Наука, 1983. – 279 с.
 13. Округин В. М. Мутновское серебро-полиметаллическое месторождение // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 книгах. Книга 1 / под ред. А. И. Ханчука. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – С. 712–716.
 14. Округин В. М. Удивительное в минералогии эпitherмальных месторождений Камчатки // Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Доклады юбилейной сессии Ученого совета Института вулканологии ДВО РАН, посвященной 275-летию Российской академии наук. – Петропавловск-Камчатский : Камчатский печатный двор, 1999. – С. 137–140.
 15. Округин В. М., Зобенько О. А., Абрамова В. Д., Яблокова Д. А. Мышьяк и золото в дендритах пирита Мутновского Au-Ag-полиметаллического месторождения // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28–29 марта 2019 г. – Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2019. – С. 209–212.
 16. Патока М. Г., Литвинов А. Ф., Петренко И. Д., Фролов Ю. Ф. Камчатка – новая золоторудная провинция России // Геология и полезные ископаемые Камчатской области и Корякского автономного округа. (Материалы региональной научно-практической конференции, 31 марта – 1 апреля 1999 г.). – Петропавловск-Камчатский : Камшат, 1999. – С. 71–72.
 17. Петренко И. Д. Золото-серебряная формация Камчатки. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 1999. – 116 с.
 18. Петренко И. Д., Большаков Н. М. Структурная позиция и возраст золото-серебряного оруденения Южной Камчатки на примере Мутновского месторождения // Тихоокеанская геология. – 1991. – № 5. – С. 100–111.
 19. Райхлин А. И., Иноземцев И. Н. Отчет о результатах геологических работ на Мутновском зо-



лото-серебряном месторождении (1-й этап) с подсчетом запасов по состоянию на 01.10.2005 года и технико-экономическим обоснованием временных кондиций. Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт экономики минерального сырья и недропользования (ВИЭМС). – М., 2007. – 180 с.

20. Шеймович В. С., Патока М. Г. Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. – М.: Недра, 1989. – 207 с.
21. Lattanzi P., Okrugin V., Corsini A., Ignatiev A., Okrugina A., Tchubarov V., Livi S. Base and precious metal mineralization in the Mutnovsky area, Kamchatka, Russia // Society of Economic Geologists. News Letter. – 1995. – № 20. – P. 5–9.

References

1. Artyukhov V. R., Bushuev A. S. Otchet o rezul'tatakh geologicheskikh rabot na Mutnovskom zoloto-serebryanom mestorozhdenii (1-i etap) s podschetom zapasov po sostoyaniyu na 01.10.2005 goda i tekhniko-ekonomicheskim obosnovaniem vremennykh konditsii. Kniga 1. [Report on the results of geological work at the Mutnovsky gold and silver deposit (1st stage) with the calculation of reserves as of 01.10.2005 and a feasibility study of temporary conditions. Book 1], Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatgeologiya Publ., 2005, 131 p.
2. Vasilevskii M. M. Vulkanogenno-rudnye poyasa i tsentry [Volcanogenic-ore belts and centers], *Prognoznaya otsenka rudonosnosti vulkanogennykh formatsii* [Predictive assessment of ore bearing of volcanic formations], Moscow, Nedra Publ., 1977, pp. 86–95.
3. Vlodavets V. I. Nachalo [Nachalo], *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsii* [Bulletin of volcanological stations], 1974, No 50, p. 39. (In Russ.).
4. Dekusar Z. B., Semina L. P., Spichenkova M. V. Otchet o gidrogeologicheskikh issledovaniyakh masshtaba 1 : 200 000, provedennykh na territorii listov N-57-XXXIII v 1971–1973 gg. [Report on hydrogeological studies on a scale of 1 : 200 000 conducted on the territory of sheets N-57-XXXIII in 1971–1973], Petropavlovsk-Kamchatsky, 1977.
5. Ermakov N. P., Dolgov Yu. A. Termobarogeokhimiya, Moscow, Nedra Publ., 1979, 271 p.
6. Zoben'ko O. A., Abramova V. D., Okrugin V. M., Filosofova T. M., Yablokova D. A. Elementy-primesi v pirite Mutnovskogo Au-Ag-polimetallichesкого mestorozhdeniya (Yuzhnaya Kamchatka) po daniym LA-ICP-MS [Impurity elements in the pyrite of the Mutnovsky Au-Ag polymetallic deposit (Southern Kamchatka) according to LA-ICP-MS], *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: Vos'maya Rossiiskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya Shkola, Moskva, 26–30 noyabrya 2018 g.* [New in the knowledge of ore formation processes: The Eighth Russian Youth Scientific and Practical School, Moscow, 26–30 November 2018], Moscow, IGM RAN Publ., 2018, pp. 156–159.
7. Ignat'ev E. K., Lezin V. I. Poyasnitel'naya zapiska k tekhnologicheskim probam Mutnovskogo mestorozhdeniya (Yuzhnaya Kamchatka) [Explanatory note to the technological samples of the Mutnovsky deposit (Southern Kamchatka)], Kamchatka region, Milkovo, Kamchatgeologiya Publ., 1992, 34 p.
8. Kratkaya ob'yasnitel'naya zapiska. Katalog mestorozhdenii, proyavlenii, punktov mineralizatsii i oreolov rasseyaniya poleznykh iskopaemykh. Karta poleznykh iskopaemykh Kamchatskoi oblasti masshtaba 1 : 500 000 [Brief explanatory note. Catalog of deposits, manifestations, points of mineralization and halos of scattering of minerals. Map of mineral resources of the Kamchatka region scale 1 : 500 000], Petropavlovsk-Kamchatsky, SP KF VSEGEI Publ., 1999, 520 p.
9. Lonshakov E. A. Kainozoiskie vulkanogennye i vulkanogenno-osadochnye formatsii Yuzhnoi Kamchatki [Cenozoic volcanogenic and volcanogenic-



- sedimentary formations of Southern Kamchatka], *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1982, No 6, pp. 94–97. (In Russ.).
10. Lonshakov E. A. Ryady vulkano-tektonicheskikh struktur i strukturno-veshchestvennye paragenezisy Yuzhno-Kamchatskogo raiona [Series of volcanic-tectonic structures and structural-material parageneses of the South Kamchatka region], *Byulleten' vulkanicheskikh stantsii* [Bulletin of volcanic stations], 1979, No 57, pp. 79–81. (In Russ.).
 11. Lonshakov E. A., Barkhatov Yu. V., Oleynic V. I. Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Yugo-Vostochnoi Kamchatki [Geological structure and minerals of Southeastern Kamchatka], *Otchet Gorelovskoi partii PGTS m-ba1 : 50 000 po rabotam 1974–1979 gg. v 4-kh tomakh. Tom I, kniga 2. Poleznye iskopaemye* [Report of the Gorelovskaya party of PGTS scale 1 : 50 000 on the works of 1974–1979 in 4 vol. I, book 2. Minerals], Petropavlovsk-Kamchatsky, MG RMFSR KTGU GE Publ., 1979, 287 p.
 12. Mozgova N. N., Tsepin A. I. Bleklye rudy (osobennosti khimicheskogo sostava i svoystv) [Fahlores (features of chemical composition and properties)], Moscow, Nauka Publ., 1983, 279 p.
 13. Okrugin V. M. Mutnovskoe srebro-polimetallicheskoe mestorozhdenie [Mutnovsky silver-polymetallic deposit], *Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. V 2 knigakh. Kniga 1* [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia. In 2 books. Book 1], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2006, pp. 712–716.
 14. Okrugin V. M. Udivitel'noe v mineralogii epitermal'nykh mestorozhdenii Kamchatki [Amazing in mineralogy of epithermal deposits of Kamchatka], *Sovremenniy vulkanizm i svyazannye s nim protsessy. Doklady yubileinoi sessii uchenogo soveta Instituta vulkanologii DVO RAN, posvyashchennoi 275-letiyu Rossiiskoi akademii nauk* [Modern volcanism and related processes. Reports of the jubilee session of the Scientific Council of the Institute of Volcanology of the FEB RAS, dedicated to the 275th anniversary of the Russian Academy of Sciences], Petropavlovsk-Kamchatsky, 1999, pp. 137–140.
 15. Okrugin V. M., Zoben'ko O. A., Abramova V. D., Yablokova D. A. Mysh'yak i zoloto v dendritakh piritita Mutnovskogo Au-Ag-polimetallicheskogo mestorozhdeniya [Arsenic and gold in pyrite dendrites of Mutnovsky Au-Ag polymetallic deposit], *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy. Materialy XXII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa, 28–29 marta 2019 g.* [Volcanism and related processes. Materials of the XXII All-Russian Scientific Conference dedicated to the Day of Volcanologist, March 28–29, 2019], Petropavlovsk-Kamchatskii, IViS DVO RAN Publ., 2019, pp. 209–212.
 16. Patoka M. G., Litvinov A. F., Petrenko I. D., Frolov Yu. F. Kamchatka – novaya zolotorudnaya provintsiya Rossii [Kamchatka is a new gold-mining province of Russia], *Geologiya i poleznye iskopaemye Kamchatskoi oblasti i Koryakskogo avtonomnogo okruga. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii 31 marta – 1 aprelya* [Geology and minerals of the Kamchatka Region and the Koryak Autonomous Okrug. Materials of the regional scientific and practical conference March 31 – April 1], Petropavlovsk-Kamchatsky, 1999, pp. 71–72.
 17. Petrenko I. D. Zoloto-serebryanaya formatsiya Kamchatki [Gold-silver formation of Kamchatka], Petropavlovsk-Kamchatsky, 1999, 116 p.
 18. Petrenko I. D., Bol'shakov N. M. Strukturnaya pozitsiya i vozrast zoloto-serebryanogo orudneniya Yuzhnoi Kamchatki na primere Mutnovskogo mestorozhdeniya [The structural position and age of the gold and silver mineralization of Southern Kamchatka on the example of the Mutnovsky deposit], *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1991, No 5, pp. 100–111. (In Russ.).
 19. Raikhlin A. I., Inozemtsev I. N. Otchet o rezultatakh geologicheskikh rabot na Mutnovskom zoloto-serebryanom mestorozhdenii (1-i etap) s podschetom zapasov po sostoyaniyu na 01.10.2005 goda i tekhniko-ekonomicheskim obosnovaniem vremennykh konditsii [Report on the results of geological work at the Mutnovsky gold and silver deposit (1st stage) with the calculation of reserves as of 01.10.2005 and a feasibility study of temporary conditions], VIEMS, Moscow, 2007, 180 p.
 20. Sheimovich V. S., Patoka M. G. Geologicheskoe stroenie zon aktivnogo kainozoiskogo vulkanizma [Geological structure of active Cenozoic volcanism zones], Moscow, Nedra Publ., 1989, 207 p.

21. Lattanzi P., Okrugin V., Corsini A. [et. al.]. Base and precious metal mineralization in the Mutnovsky area, Kamchatka, Russia, Society of Economic Geologists. News Letter, 1995, No 20, pp. 5–9.
22. Okrugin V. M., Zelensky M. E. Miocene to quaternary center of volcanic, hydrothermal and ore forming activity in the Southern Kamchatka, Metallogeny of the Pacific Northwest, Vladivostok, 2004, pp. 147–174.
23. Okrugin V. M. Part 1. Mutnovsky geothermal field: Mutnovsky Hydrothermal Field Uzon-Geyser Depression, Post-Session Field Trip to Kamchatka. 8th International Symposium on Water-Rock Interaction, Vladivostok, 1995, pp. 1–29.
24. Takahashi R., Matsueda H., Okrugin V., Ono S. Polimetalllic and Au-Ag mineralization at the Mutnovskoe deposit in South Kamchatka, Resource Geology, 2006, V. 56, No 2, pp. 141–156.

Авторы

Шишканова Ксения Олеговна

научный сотрудник
shks_1507@mail.ru

Округин Виктор Михайлович

кандидат геолого-минералогических наук

Философова Татьяна Михайловна

научный сотрудник
philosofova@yandex.ru

ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Authors

Ksenia O. Shishkanova

Researcher
shks_1507@mail.ru

Viktor M. Okrugin

PhD

Tatyana M. Filosofova

Researcher
philosofova@yandex.ru

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia