

Минералогия современной Мутновской гидротермальной системы и одноименного серебро-полиметаллического месторождения (Южная Камчатка)

Зобенько О.А. , Шишканова К.О. 

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, zobenko.olesya@yandex.ru

Аннотация. Изучение процессов, протекающих в недрах современных гидротермальных систем, может помочь смоделировать этапы формирования гидротермальных рудных месторождений. Для подобных исследований как нельзя лучше подходят регионы, расположенные в зонах перехода континент-океан, в частности Северо-Запад Тихоокеанского региона – полуостров Камчатка. В настоящей работе рассмотрены минералогическо-геохимические особенности отложений из глубинных термальных вод Мутновского месторождения парогидротерм и их сопоставление с рудами одноименного серебро-полиметаллического месторождения. Комплексом методов – от классической химии до современных методов локального физико-химического анализа – в осадках из гидротермальных растворов выявлен широкий спектр минералов – как оксидных соединений, так и рудных фаз (от халькозина, пирита и халькопирита до электрума, сульфидов и селенидов серебра). Предположено, что происходящие в настоящее время на Мутновском месторождении парогидротерм процессы схожи с гидротермальными процессами, которые привели к образованию жильных зон одноименного золото-серебро-полиметаллического месторождения. Это может быть полезным в установлении условий отложения и накопления аномального количества рудного вещества в вулканотектонических структурах.

Ключевые слова: вулканогенное рудообразование, современные гидротермальные системы, эпitherмальная минерализация, рудные минералы, золото, серебро.

Mineralogy of the modern Mutnovskaya hydrothermal system and the silver-polymetallic deposit of the same name (South Kamchatka)

Zoben'ko O.A. , Shishkanova K.O. 

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, zobenko.olesya@yandex.ru

Abstract. The study of processes occurring in the bowels of modern hydrothermal systems can help to model the stages of formation of hydrothermal ore deposits. The regions located in the continent-ocean transition zones, in particular, the Northwest Pacific - Kamchatka Peninsula, are the most suitable for such studies. In the present work mineralogical and geochemical features of deposits from deep thermal waters of the Mutnovsky steam-hydrothermal deposit and their comparison with ores of the silver-polymetallic deposit of the same name are considered. A complex of methods - from classical chemistry to modern methods of local physical-chemical analysis - revealed a wide range of minerals - both oxide compounds and ore phases (from chalcocite, pyrite and chalcopyrite to electrum, sulfides and silver selenides) in sediments from hydrothermal solutions. It is assumed that the processes currently occurring at the Mutnovskoe vapor-hydrothermal deposit are similar to the hydrothermal processes that led to the formation of vein zones of the gold-silver-polymetallic deposit of the same name. This may be useful in establishing the conditions of deposition and accumulation of anomalous amounts of ore matter in volcano-tectonic structures.

Keywords: volcanogenic ore formation, modern hydrothermal systems, epithermal mineralization, ore minerals, gold, silver.

Введение

Первые исследования взаимосвязи современных гидротермальных систем (горячих источников) и эпitherмальных рудных месторождений начались в середине XX века (White, 1955, 1965, 1967). Современные гидротермальные системы впервые стали рассматривать в качестве рудообразующих с конца 1960-х гг. Так на примере отложений с оборудования геотермальных станций было показано, что из гидротермальных растворов способны отлагаться рудные минералы, в том числе минералы золота и серебра (Skinner et al., 1967; Weissberg, 1969). Дальнейшие исследования показали, что изучение циркулирующих гидротермальных растворов, отлагающихся из них минералов,

процессов переноса и накопления благородных металлов в геотермальных скважинах может помочь в моделировании этапов формирования эпitherмальных золоторудных и полиметаллических месторождений (Henley, 1984; Brown, 1986; Hedenquist, 1987; Seaward, 1987; Clark, Williams-Jones, 1990; Krupp, White et al., 2001; Williams-Jones, 2002).

Отличным полигоном для подобных исследований служит Камчатский полуостров, где широко распространены современные гидротермальные системы (ГТС) и разнообразные месторождения полезных ископаемых – от магматических до гидротермальных.

В южной части полуострова расположен Мутновский геотермальный район (МГР) площадью около 750 км². На его территории интенсивно проявлена гидротермальная деятельность – активные вулканы Горелый (1828 м), Мутновский (2323 м) с самыми мощными фумарольными полями, многочисленные выходы на поверхность парогидротерм, горячих и перегретых вод (Чудаев, 2003). В южной части МГР находится одна из крупнейших на Камчатке Мутновская ГТС, включающая одноименное месторождение парогидротерм, на базе которого функционируют две геозлектростанции (ГеоЭС): Верхне-Мутновская (12 МВт, 1999 г.) и Мутновская (50 МВт, 2002 г.). Здесь же расположен крупнейший рудный объект Южно-Камчатского горнорудного района – Мутновское гидротермальное Au-Ag-Cu-Pb-Zn месторождение с запасами С1: золота – 1776 кг, серебра – более 27 т. Главная рудная зона месторождения расположена всего в 1.2 км от промышленных скважин Мутновской ГеоЭС. (Краткая объяснительная записка, 1999; Патока и др., 1999; Петренко, 1999; Округин, 2006).

Геологическое строение района

МГР относят к крупному долгоживущему вулcano-тектоническому центру, где продолжают происходить магматические, вулканические и гидротермальные процессы с миоцена по настоящее время (Василевский, 1977).

В геологическом строении района принимают участие кайнозойские вулканиты, которые объединяют вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования олигоцен-миоценового возраста и современные голоценовые отложения (рис. 1). Они представлены лавами, туфами, конгломератами, песчаниками, алевролитами – суммарной мощностью более 2 км.

Верхние разрезы на территории Мутновского месторождения парогидротерм сложены экструзивными, эффузивными и пирокластическими породами средне- и верхнеплейстоценового возраста от андези-дацитового до риолитового составов. На юге отложения перекрыты лавами и пирокластикой Мутновского вулкана. На востоке и северо-востоке месторождение условно ограничено склонами древней постройки Жировского палеовулкана. В центральной части на поверхность выведен сложный комплекс экструзивных, пирокластических и озерноосадочных пород от риолитового до базальтового составов, которые были сформированы в кальдерных условиях, начиная со среднего плейстоцена (Вакин и др., 1986).

Мутновское рудное месторождение приурочено к постройке Жировского палеовулкана, возраст которого отнесен к позднеплиоцен-раннеплейстоценовому. Палеовулкан расположен в области пересечения субмеридионального отрезка Южно-Камчатской системы рудоконтролирующих сбросов с Мутновским глубинным разломом северо-восточного простирания (Петренко, 1999; Округин, 2006).

Мутновское месторождение объединяет крупную стволую жилу меридионального простирания с субвертикальным падением «Определяющая» и несколько более мелких оперяющих жил и многочисленных разноориентированных прожилков (Петренко, 1999; Округин, 2006). «Определяющая» расположена в центральной части месторождения, а ее северные и южные фланги существенно отличаются типами оруденения. На северном фланге преобладает малосульфидный тип руд (золото-серебряный), в которых сосредоточены основные запасы золота. На Южном – сульфидно-полиметаллические (золото-серебро-полиметаллические). В целом, на месторождении также встречаются кварц-карбонатные, марганцевые, марганец-кварц-карбонатные руды (Lattanzi et al., 1995; Петренко, 1999; Округин, 2006; Takahashi et al., 2006).

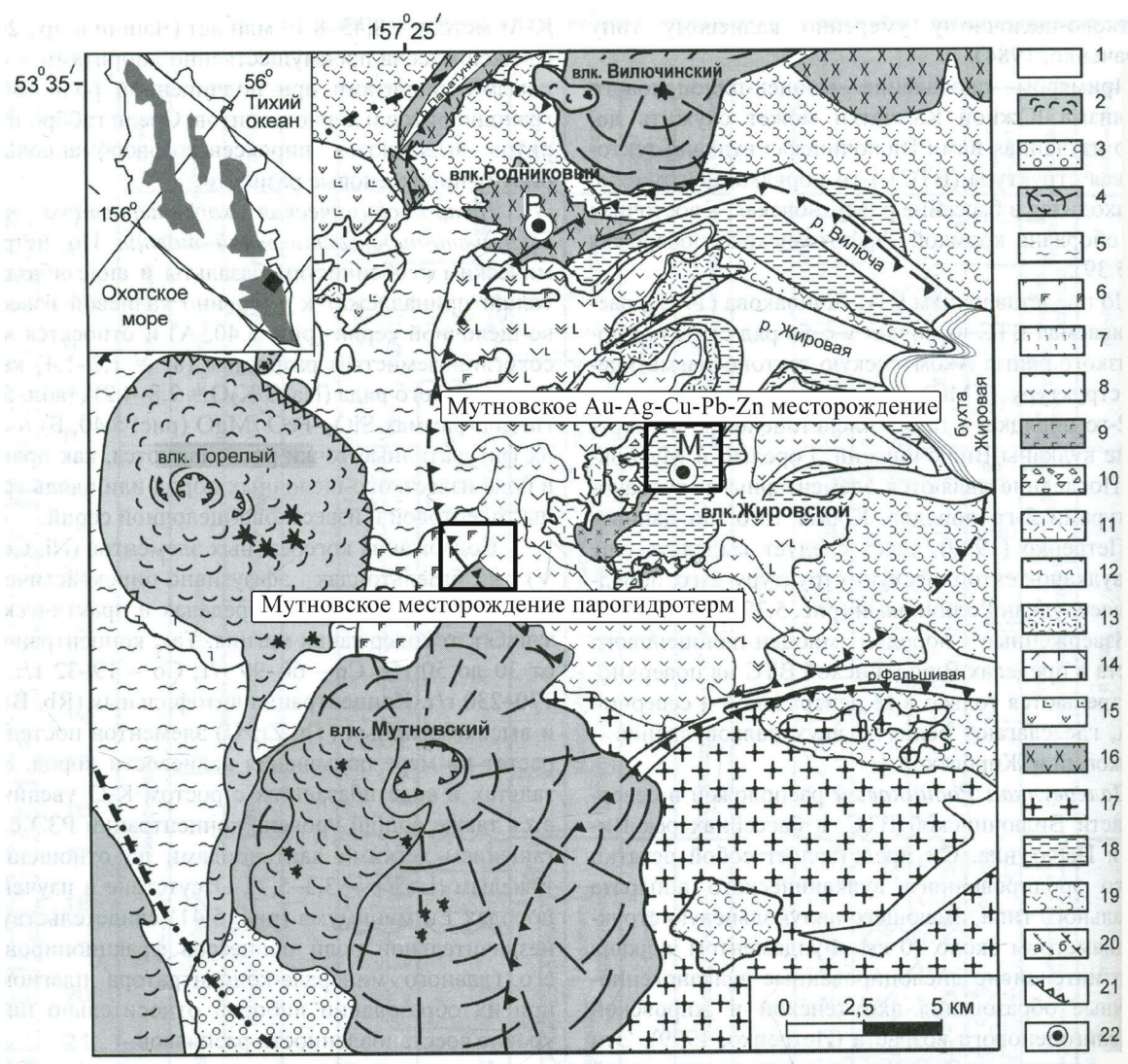


Рис. 1. Схема геологического строения изучаемого района (Чашин и др., 2000).

1 – флювиальные четвертичные отложения; 2 – нерасчлененные четвертичные вулканы; 3 – плейстоценовые (?) габбро-диориты; 4 – нерасчлененные миоцен-плиоценовые вулканы; 5 – олигоцен-миоценовые гранитоиды; 6 – кальдерные структуры; 7 – действующие вулканы; 8 – Мутновское месторождение парогидротерм; 9 – установленные (а) и предполагаемые (б) разломы; 10 – рудные поля; 11 – главные рудные зоны и жилы; 12 – прочие рудные объекты.

Fig. 1. The scheme of the geological structure of the studied area (Chashchin et al., 2000).

1 – fluvial Quaternary deposits; 2 – undissected Quaternary volcanics; 3 – Pleistocene (?) gabbro-diorites; 4 – nondissected Miocene-Pliocene volcanites; 5 – Oligocene-Miocene granitoids; 6 – caldera structures; 7 – active volcanoes; 8 – Mutnovskoye deposit of steam-gidrotherms; 9 – established (a) and supposed (b) faults; 10 – ore fields; 11 – main ore zones and veins; 12 – other ore objects.

Фактический материал и методы исследования

В настоящей работе использованы коллекции образцов руд, собранные в рамках научно-исследовательских работ лаборатории вулканогенного рудообразования в 2005 и 2010 гг., а также образцы глубинных термальных вод, которые были отобраны в 2018 г. сотрудниками АО «Геотерм» с помощью пробоотборника Kuster.

Минераграфические описания и фотодокументация выполнены с помощью прецизионных микроскопов Carl Zeiss Axioskop 40 и Nikon Eclipse LV 100 pol.

Минеральный состав руд и осадков изучен на сканирующем электронном микроскопе на микроскопе Vega III Tescan с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm².

Напыление токопроводящего слоя производилось углеродом. Ускоряющее напряжение составляло 20 кэВ, ток 1 нА, размер возбуждаемой поверхности 5×5 мкм.

Составы рудных минералов также определялись на рентгеновском электронно-зондовом микроанализаторе Camebax 244 с четырьмя волновыми и одним энергетическим спектрометрами и приставкой Inca Oxford Instruments. Условия съемки: тонко сфокусированный пучок электронов (1.5–5.0 мкм), ускоренных до 25 кэВ, суммарный ток 25–50 нА.

В Аналитическом Центре (АЦ) ИВиС ДВО РАН были выполнены следующие исследования:

- определения содержаний петрогенных оксидов методом рентгенофлуоресцентного анализа на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer (Bruker, США);
- диагностика минеральных фаз с помощью дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония);
- ИК-спектроскопия на спектрометре IRAffinity (Shimadzu, Япония).

Минеральный состав руд Мутновского серебро-полиметаллического месторождения

Руды отличаются значительным разнообразием текстур и структур – от полосчатых и прожилковых до вкрапленных и брекчиевых при различных их комбинациях (рис. 2). Руды образовывались путем метасоматического замещения рудовмещающих пород и жильного выполнения трещин.

Минеральный состав довольно сложный и разнообразный (табл. 1, рис. 3). Главные гипогенные минералы сосредоточены, в основном, на южном фланге и в центральной части месторождения. Они представлены широким спектром минералов серебра, золота, меди, свинца, марганца, железа.

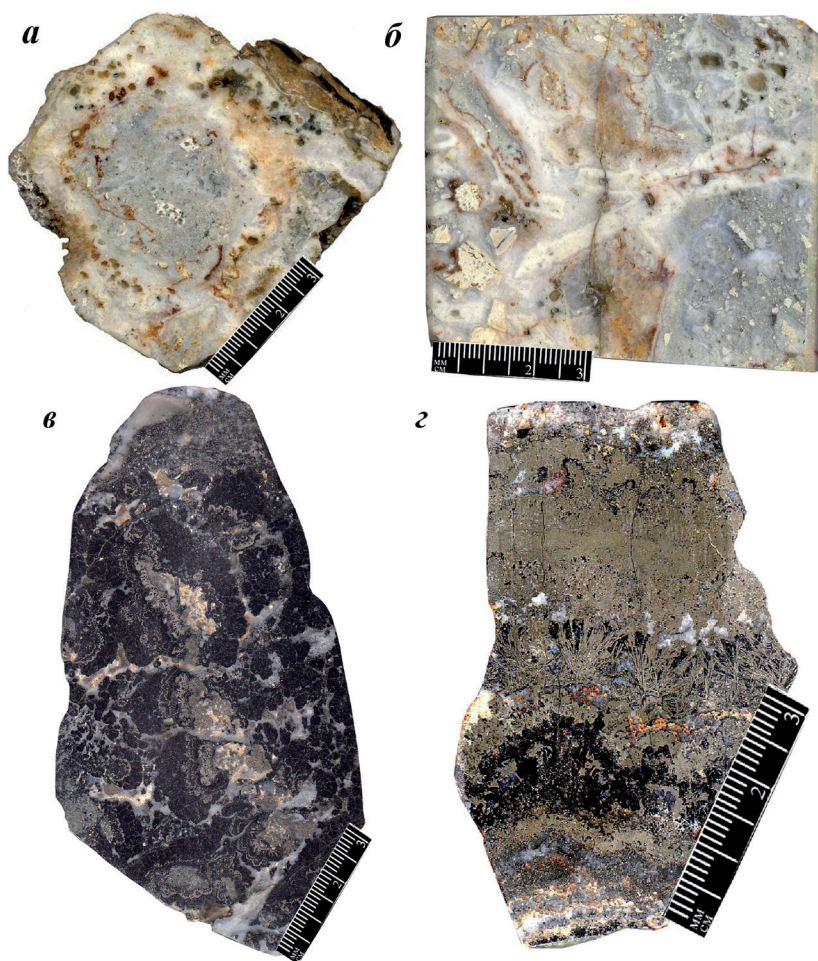


Рис. 2. Представительные типы руд жильной зоны Определяющая: а, б – золото-серебряные; в, г – золото-серебро-полиметаллические. Полированные штуды.

Fig. 2. Representative types of ores of the vein zone Opredelyayushchaya: a, b – gold-silver; c, d – gold-silver-polymetallic. Polished slabs.

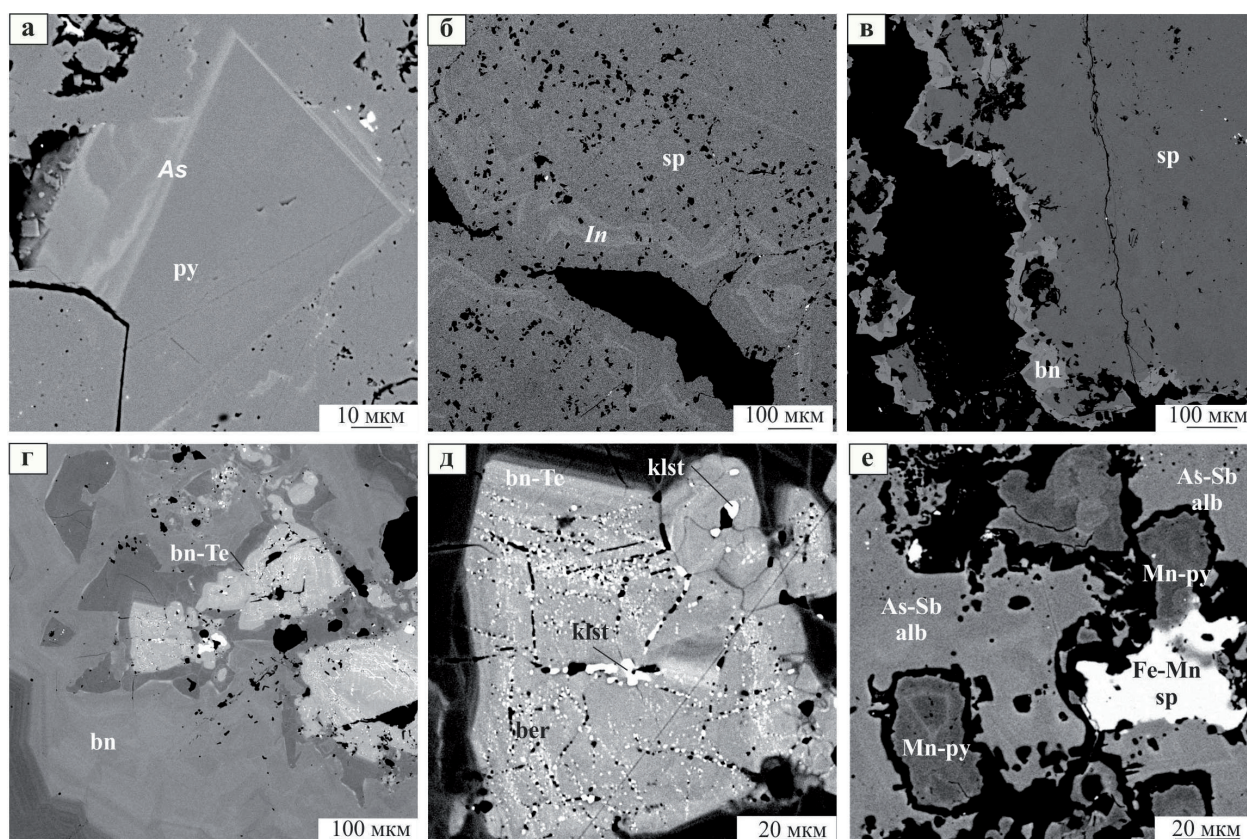


Рис. 3. Неоднородное по химическому составу строение и взаимоотношение рудных минералов: а – пирит (py); б – сфалерит (sp), светлые зоны обогащены As (py), In (sp); в-г – блеклые руды (bn); д – Te-содержащие блеклые руды (bn-Te), клаусталит (klst); е – алабандин (alb). Светлые зоны содержат As и Sb (alb), Mn (py). Фото в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 3. Heterogeneous in chemical composition structure and relationship of ore minerals: a – pyrite (py); б – sphalerite (sp), the light zones are enriched in As (py), In (sp); c-d – fahlore (bn); e – Te-bearing fahlore (bn-Te), clausthalite (klst); f – alabandine (alb). Light zones contain As and Sb (alb), Mn (py). Photo in backscattered electrons.

Характерными минералами считаются сульфосоли мышьяка, сурьмы, минералы олова, различные теллуриды и сложные сульфоселениды висмута. Гипергенные более распространены в рудах северного фланга. Среди них преобладают глинистые минералы, сульфаты, оксиды и гидроксиды железа и марганца.

Отличительная характеристика месторождения – большое количество сульфидов, обилие второстепенных и редких минералов. Среди рудных минералов наиболее распространены пирит, сфалерит, галенит, из жильных минералов – кварц. Второстепенные и редкие минералы представлены блеклыми рудами, халькопиритом, теллуридами Au, Ag, Pb, Bi, самородным золотом, сульфосолями Bi, Se, Ag. В большинстве случаев минералы имеют зональное строение, при широком диапазоне в них элементов-примесей. Особенно это характерно для пирита, сфалерита, галенита, блеклых руд, алабандина и др. (Округин, 2006; Шишканова и др., 2022)

Повышенные концентрации в рудах отдельных химических элементов считаются важными отличительными признаками месторождения: As (до 19.58 %), Cu (до 4.98 %), Zn (до 4.75 %) – для пирита; Cd (до 6 %), In (до 11 %) – для сфалеритов; Se (до 9.93 %) – для галенитов; Ag (до 20.26 %), Te (до 17.38 %) и Bi (до 4.22 %) – для блеклых руд (Округин, 2006; Шишканова и др., 2022).

Особое значение имеет марганец. Он представлен широким разнообразием форм нахождения – образует как собственные минералы (алабандин, гауерит, родохрозит), так и входит в структуру других минералов (пирит, сфалерит, блеклые руды и др.) (Яблокова и др., 2022).

Самородное золото обладает сложной дендритовидной формой, обладает неоднородным строением, в составе в качестве элемента-примеси содержит Hg в количестве до 3 % (Округин, 2006).

Таблица 1. Минеральный состав руд жильной зоны Определяющая
Table 1. Mineral composition of ores in the main vein Opredelyayushchaya

Минералы	Гипогенные		Гипергенные
	Рудные	Жильные	
Главные	пирит FeS_2 (As, Cu, Zn) сфалерит ZnS (Mn, Fe, Cu, Cd, In) галенит PbS (Se)	кварц SiO_2 кальцит CaCO_3	халцедон $10 \text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ опал $4\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{AlSi}_2\text{O}_6\text{OH} \times 2\text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}\text{OH}$ 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 $(\text{Ag}, \text{Cu})_{14}(\text{Ag}, \text{Sb})_2\text{S}_{11}$ арсенполибазит $(\text{Ag}, \text{Cu})_{16}(\text{As}, \text{Sb})_2\text{S}_{11}$ энаргит Cu_3AsS_4 люционит $\text{Cu}_4(\text{As}, \text{Sb})\text{S}_4$ 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 $\text{Cu}_8(\text{Fe}, \text{Zn})_3\text{Sn}_2\text{S}_{12}$ канфильдит Ag_3SnS_6 диафорит $\text{Ag}_3\text{Pb}_5\text{Sb}_6\text{S}_8$ овихит $\text{Ag}_3\text{Pb}_5\text{Sb}_6\text{S}_{15}$ киноварь HgS гессит Ag_2Te алтаит PbTe сильванит AgAuTe_4 теллу- ровисмутит Bi_4Te_3 колорадоит HgTe тетрадимит $\text{Bi}_{14}\text{Te}_{13}\text{S}_8$ клаусталит PbSe самородные: Au, Ag, Al, Fe, As сульфоселениды Bi бериит $\text{Cu}_4\text{Ag}_2\text{Pb}_3\text{Bi}_7\text{S}_{16}$ гауерит MnS	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 $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ брушит $\text{CaHPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ пумпеллиит $\text{Ca}_2\text{MgAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} \times 2\text{H}_2\text{O}$

Минеральный состав осадков из глубинных термальных вод Мутновской ГТС

Исследуемые образцы глубинных термальных воды имеют сульфатно-хлоридный калий-натриевый состав, минерализацию 1.07–1.15 г/дм³ и водородный показатель 9.26.

Изучение выпавшего в результате осаждения при комнатной температуре осадка из термальных вод, показало широкое разнообразие минеральных фаз. Макроскопически осадки представляют собой рыхлую массу от полупрозрачного до бело-молочного цвета с мельчайшими вкрапленностями темных фаз сульфидов и оксидов железа.

В осадках установлены следующие содержания элементов: Ni, Cu, As (тысячи ppm); Li, Rb, Cr, Zn, Ag, Sb (сотни ppm); Au, Se, Pb, V, Mo, Sr, Cs, Ba, W (десятки ppm), что отражается и в минеральном составе.

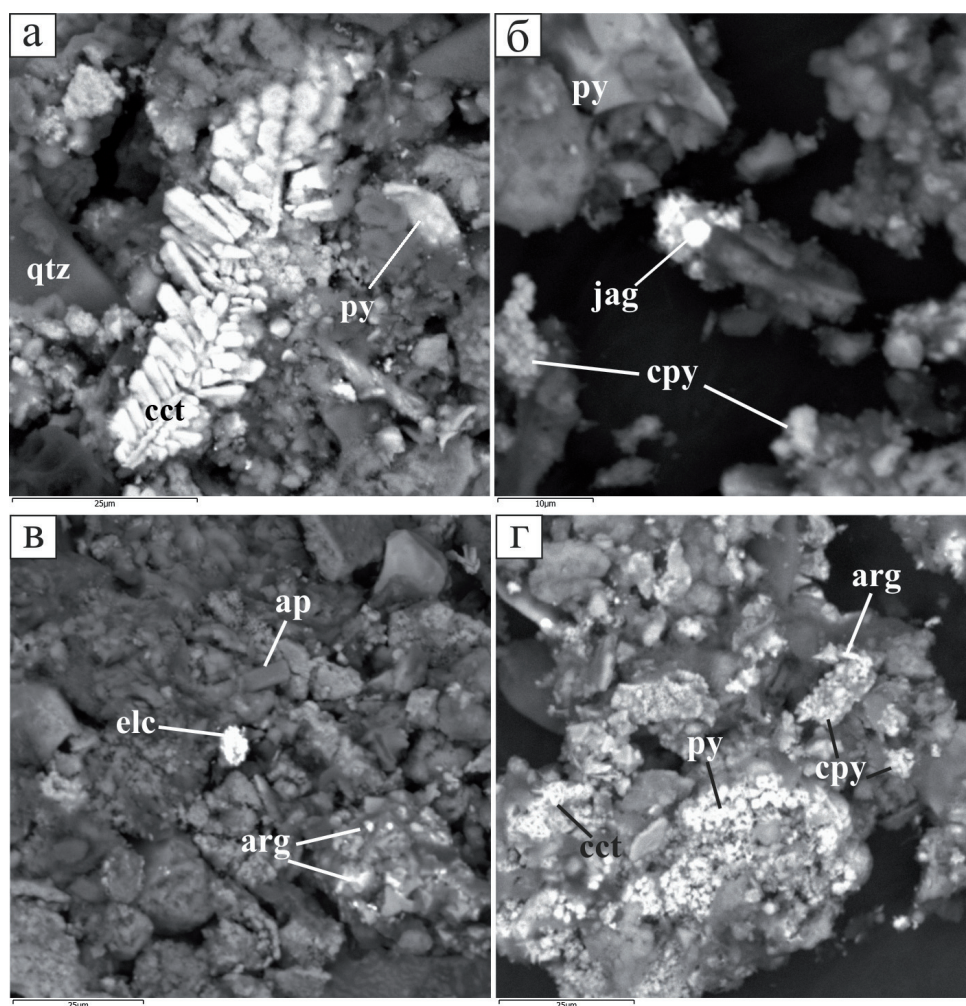


Рис. 4. Минеральный состав осадков термальных вод Мутновского месторождения парогидротерм: а – дендритовидный агрегат халькозина (cct) в кремнистой массе (qtz) с микровключениями пирита (py); б – зерно йодаргирита (jag) в ассоциации с пиритом (py) и халькопиритом (cpy); в – микровключения F-содержащего апатита (ap), электрума (elc) и аргентита (arg); г – ассоциация пирита (py), халькопирита (cpy), халькозина (cct) и аргентита (arg). Фото в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 4. Mineral composition of the sediments of thermal waters of the Mutnovskoe steam-hydrothermal deposit: a – dendritic aggregate of chalcocite (cct) in a siliceous mass (qtz) with microinclusions of pyrite (py); b – grains of iodargyrite (jag) in association with pyrite (py) and chalcopyrite (cpy); c – microinclusions of F-bearing apatite (ap), electrum (elc), and argentite (arg); d – association of pyrite (py), chalcopyrite (cpy), chalcocite (cct), and argentite (arg). Photo in backscattered electrons.

Основная масса осадков представлена соединениями кремния (от аморфных опала и халцедона до кристаллического кварца), галитом (NaCl) и тенардитом (Na_2SO_4). Подчиненное значение имеют адуляр ($\text{K}_2\text{Si}_3\text{O}_8$), анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), кальцит (CaCO_3), волластонит ($\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$), барит (BaSO_4), F-апатит ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), образующие микровключения размером до 20–30 мкм. В виде наростов на поверхности SiO_2 диагностированы афтиталит ($\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$) и когаркоит ($\text{Na}_3(\text{SO}_4)\text{F}$). В тесных срастаниях присутствуют арканит (K_2SO_4) и натросилит ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$).

Не меньшим разнообразием отличаются рудные минералы (рис. 4). Многочисленные оксиды железа встречаются в виде близких к изометричным зерен от 5 до 30 мкм и сферолитов до 50 мкм. В виде дендритовидных и «ажурных» агрегатов размером до 20–30 мкм присутствует халькозин (Cu_2S). В качестве микровключений размером 5–20 мкм встречается пирит (FeS_2), халькопирит (CuFeS_2) и галенит (PbS).

Особый интерес представляют минералы благородных металлов. Чаще всего они встречаются в ассоциации с пиритом, халькозином и имеют размеры до 10 мкм. Обнаружены собственные ми-

неральные формы серебра: науманит – селенид серебра (Ag_2Se), йодаргирит – йодид серебра (AgI) и аргентит – сульфид серебра (Ag_2S). А также диагностировано золото (электрум) в виде единичных зерен от 2 до 5 мкм.

Обсуждение результатов и выводы

Химический состав гидротермальных растворов и выпавших из них осадков находит свое сходство с теми гидротермальными флюидами, которые сформировали жилы рудного месторождения. Температуры растворов современной ГТС по данным из разных скважин составляет 150–260 °С. В то же время для Мутновского рудного месторождения по данным изучения газожидких включений температуры рудообразования оцениваются 200–260 °С (Takahashi et al., 2006).

Представленные данные о минеральных составах обоих объектов также обнаруживают сходство как среди оксидных соединений – таких как кварц, адуляр, кальцит, плагиоклазы, барит, так и разнообразных рудных минералов – пирит, сфалерит, халькопирит, и что примечательно минералов золота и серебра.

Ранее были исследованы также техногенные образования, отлагающиеся в процессе эксплуатации ГеоЭС на разных деталях оборудования. Кроме пирита, пирротина, халькопирита, галенита и минералов группы блеклых руд впервые для подобных отложений были диагностированы минералы золота и серебра – электрум, гессит, аргентит.

Кроме того, изучение минерального состава пород в зоне пропаривания над геотермальным резервуаром Мутновского месторождения парогидротерм показало, что с глубиной увеличивается:

- интенсивность гидротермальных изменений пород;
- масштабы развития минералов, содержащих летучие компоненты (фтор, хлор);
- количество рудных минералов, их разнообразие и наличие в них элементов-примесей (в первую очередь обращает на себя внимание присутствие такого типоморфного минерала для золотоносных жил как мышьяксодержащий пирит) (Зобенько и др., 2021).

Таким образом, минеральный состав пород зоны пропаривания Мутновского месторождения парогидротерм, осадков из его глубинных вод, а также отложений на элементах конструкций действующих ГеоЭС имеет схожие черты с минеральным составом жильных зон Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения, расположенного в непосредственной близости от продуктивных скважин. Это демонстрирует то, что высокотемпературные геотермальные резервуары Мутновского месторождения парогидротерм – фрагменты долгоживущей геотермальной системы, продуктом эволюции которой является Мутновское рудное месторождение.

Проведение дальнейших исследований современной гидротермальной системы помогут реконструировать процессы переноса, отложения и накопления рудного вещества в пределах схожих вулканогенно-тектонических структур.

Благодарности

Авторы признательны руководству АО «Геотерм» за возможность проведения полевых работ и предоставление необходимых водных проб; сотрудникам лаборатории вулканогенного рудообразования В.В. Куликову и А.А. Платонову, обеспечившим необходимую пробоподготовку образцов для прецизионных исследований; сотрудникам АЦ ИВиС ДВО РАН – А.А. Кузьминой и С.В. Сергеевой за высококачественные аналитические исследования.

Работа выполнена в рамках темы НИР №0282-2019-0007.

Литература

1. Белоусов В.И. Геология геотермальных полей в современных вулканических областях. Наука. 1978. 173 с.
2. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф., Сугробов В.М. Общая характеристика Мутновского месторождения и прогнозная оценка ресурсов // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука. 1986. С. 6–40.
3. Василевский М.М. Вулканогенно-рудные пояса и центры // Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций. М.: Недра. 1977. С. 86–95.

4. Зобенько О.А., Округин В.М., Чернев И.И., Плутахина Е.Ю., Яблокова Д.А., Карташева Е.В. Хемогенные отложения Мутновского геотермального комплекса (Южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. Вып. 51. № 3. 2021. С. 66–76. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-66-76>.
5. Краткая объяснительная записка. Каталог месторождений, проявлений, пунктов минерализаций и ореолов рассеяния полезных ископаемых. Карта полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1: 500 000 / ред. А.Ф. Литвинов, М.Г. Патока, Б.А. Марковский. Петропавловск-Камчатский: СП КФ ВСЕГЕИ. 1999. 520 с.
6. Округин В.М. Мутновское серебро-полиметаллическое месторождение // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Изд-во Дальнаука. 2006. Кн. 1. С. 712–716.
7. 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.
8. Петренко И.Д. Золото-Серебряная Формация Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1999. 116 с.
9. Петренко И.Д., Большаков Н.М., Гуменюк В.А., Полетаева А.А. Минералогическая, геохимическая и палеогеогеохимическая зональность Мутновского рудного поля (Камчатка) // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 6. С. 103–108.
10. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Сандимирова Е.И., Белоусов В.И. Рудные минералы в структуре гидротермально-магматических систем: состав, распределение, условия формирования // Геотермальные и минеральные ресурсы районов современного вулканизма. Петропавловск-Камчатский: Изд-во «ОТТИСК». 2005. 460 с.
11. Чашин А.А., Полин В.Ф., Иванов В.В., Коновалова Н.П., Екимова Н.А. Флюидный режим палеогеновой и неогенчетвертичной олово-серебряных и золото-серебряных рудно-магматических систем Корякии и Камчатки // Рудные месторождения континентальных окраин / ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2000. 276 с.
12. Чашин А.А., Мартынов Ю.А. Срединно-Камчатский вулканический пояс: Южно-Камчатская и Центрально-Камчатская зоны (олигоцен-миоцен) // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 294–305.
13. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Изд-во Дальнаука. 2003. 216 с.
14. Шарапов В.Н. Влияние структурно-динамических условия разгрузки гидротермальных вулканических систем на рудообразование в их недрах // ДАН. 2010. Т. 432. № 3. С. 396–402.
15. Шишканова К.О., Округин В.М., Философова Т.М. Руды и металлы. 2022. № 3. С. 78–100. DOI: <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10018>.
16. Яблокова Д.А., Шишканова К.О., Округин В.М. Марганец в рудах золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка) // Геология на окраине континента. II молодежная научная конференция-школа ДВГИ ДВО РАН, Владивосток, 12–16 сентября 2022 г. Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2022. С. 161–164. DOI <https://doi.org/10.24866/7444-5330-5>.
17. Brown K.L. Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand // Economic Geology. No. 81. 1986. P. 983–997.
18. Clark J.R., Williams-Jones A.E. Analogues of epithermal gold–silver deposition in geothermal well scales // Nature. No. 346. 1990. P. 644–645.
19. Hedenquist J.W., Henley R.W. Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: their origin, associated breccias, and relation to precious metal mineralization // Economic Geology. No. 80. 1985. P. 1640–1668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1640>.
20. Henley R.W. Metals in hydrothermal fluids // Fluid–Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems, Reviews in Economic Geology. V. 1. Society of Economic Geology, Boulder, CO, 1984. P. 115–129.
21. Krupp R.E., Seaward T.M. The Rotokawa geothermal system, New Zealand; an active epithermal gold-depositing environment // Economic Geology. No. 82. 1987. P. 1109–1129.
22. 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. No. 20. P. 5–9.
23. Skinner B.J., White D.E., Rose H.J., Mays R.E. Sulphides associated with the Salton Sea geothermal brine // Economic Geology. No. 62. 1967. P. 316–330. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.62.3.316>.
24. Takahashi R., Matsueda H., Okrugin V.M., Ono S. Polymetallic and Au-Ag mineralization at the Mutnovskoe deposit in South Kamchatka, Russia // Resource geology. 2006. V. 56. No. 2. P. 141–156.

25. Weissberg B.G. Gold–silver ore-grade precipitates from New Zealand thermal waters // *Economic Geology*. No. 64. 1969. P. 95–108.
26. White D.E. Thermal springs and epithermal ore deposits // *Economic Geology*. 50th Anniversary volume. No. 1. 1955. P. 99–154.
27. White D.E. Metal contents of some geothermal fluids // *Symposium on Problem of Postmagnetic Ore Deposition*. V. II. Prague. 1965. P. 432–443.
28. White D.E. Mercury and base-metal deposits with associated thermal and mineral waters // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 1967. P. 575– 631.
29. White D.E., Heropoulos C., Fournier R.O. Gold and other minor elements associated with the hot springs and Geysers of Yellowstone National Park, Wyoming, Supplemented with data from Steamboat Spring, Nevada // *U.S. Geological Survey Bulletin*. 2001. P. 19.
30. Williams-Jones, A.E., Migdisov, A.A., Archibald, S.M., Xiao,Z. Vapour-transport of ore metals. // *Water–Rock Interactions, Ore Deposits and Environmental Geochemistry: Special Publication*. V. 7. Geochemical Society. Houston. TX. 2002. P. 279– 306.