

ХЕМОГЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

© 2021 О.А. Зобенько¹, В.М. Округин¹, И.И. Чернев², Е.Ю. Плутахина¹,
Д.А. Яблокова¹, Е.В. Каргашева¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: zobenko@kscnet.ru
²ПАО «Камчатскэнерго», Петропавловск-Камчатский, Россия, 683009

Исследуя процессы, протекающие на действующих геотермальных станциях можно смоделировать и понять некоторые особенности образования минералов геотермального происхождения, процессы переноса гидротермальными растворами и концентрирования ряда металлов по аналогии с рудообразующими процессами на сформировавшихся месторождениях. При выбросах пароводяной смеси и излиянии вод из скважин осаждается силикагель, происходит миграция ряда элементов (в том числе благородных металлов), накопление их в осадках. Большую роль при эксплуатации скважин, работе турбин, сепараторов и других элементов конструкций геотермальных станций играет химический состав теплоносителя. Из-за его высокой минерализации происходит отложение новообразований на различных узлах и деталях оборудования, что естественным образом может осложнить работу геотермальной станции. В статье охарактеризован вещественный состав хемогенных отложений на различных технологических элементах Мутновской геотермальной электростанции. Представлены данные об отложениях, отобранных в скважинах, на лопатках турбин и сепараторе. Выявлено широкое разнообразие, как оксидных соединений, так и рудных фаз (от магнетита, халькопирита, минералов группы блеклых руд до самородного золота, теллуридов, селенидов и сульфидов золота и серебра). Сделано предположение, что процессы, происходящие в настоящее время на Мутновском месторождении парогидротерм, сопоставимы с гидротермальными процессами, которые способствовали формированию жильных зон одноименного золото-серебро-полиметаллического месторождения.

Ключевые слова: хемогенные отложения, Мутновский геотермальный комплекс, рудные минералы.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязь эпитептермальных рудных месторождений с горячими источниками была исследована во второй половине XX в. (White, 1955, 1965, 1967). В конце 1960-х гг. современные гидротермальные системы (ГТС) были впервые рассмотрены в качестве рудообразующих. На примере отложений на оборудовании 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, минералов гидротермального генезиса, процессов переноса и концентриро-

вания благородных металлов в геотермальных скважинах может помочь смоделировать этапы формирования эпитептермальных золоторудных и полиметаллических месторождений (Brown, 1986; Clark, Williams-Jones, 1990; Hedenquist, 1985, 1987; Henley, 1984; Krupp, Seaward, 1987; White et al., 2001; Williams-Jones, 2002).

Помимо решения фундаментальных задач изучение миграции и накопления гидротермальными растворами благородных металлов и полиметаллов имеет и прикладное значение. Содержащиеся в пароводяной смеси (ПВС) гидротермальных систем полезные микрокомпоненты порой обладают даже большей стоимостью, чем производимая ПВС электроэнергия (Трухин, 2003; Brown, 2003; Hedenquist, 1985; Simmons, 2016). Поэтому необходимо учитывать особенности

минерализации растворов при разработке технологических схем геотермальных станций (ГеоЭС) для извлечения полезных компонентов и обеспечения безотходного производства.

На полуострове Камчатка насчитывается множество ГТС (Кириухин, 2019), а на двух из них — Паужетской и Мутновской, — функционируют ГеоЭС. Паужесткая ГеоЭС мощностью 12 МВт самая первая в России введена в эксплу-

атацию в 1966 г. (Белоусов, 2009; Королева, 2005). Мутновская высокотемпературная гидротермальная система, расположенная в Мутновском геотермальном районе, одна из крупнейших на полуострове. На ее базе эксплуатируются Верхне-Мутновская (с 1999 г.) и Мутновская (с 2002 г.) ГеоЭС мощностью 12 и 50 МВт, соответственно. Вместе они образуют Мутновский геотермальный комплекс (МГК) (рис. 1), который обеспечивает

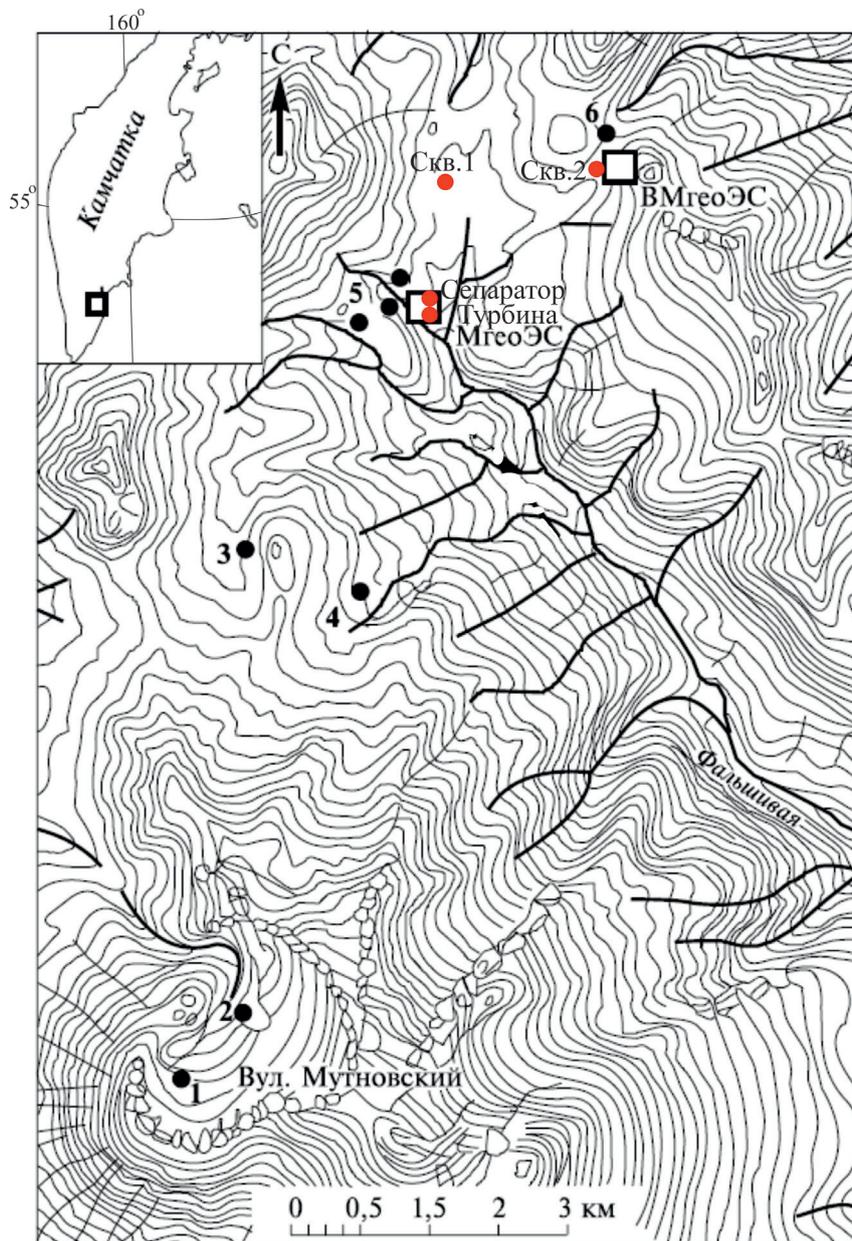


Рис. 1. Схема Мутновского геотермального района по ((Кугаенко, Мельников, 2006) с дополнениями). Естественные термопроявления: 1 — активная воронка кратера вулкана Мутновский; 2 — Донное фумарольное поле Мутновского вулкана; 3 — Северо-Мутновские западные; 4 — Северо-Мутновские восточные; 5 — Дачные; 6 — Верхнемутновские. Геотермальные электростанции: МгеоЭС — Мутновская; VMгеоЭС — Верхнемутновская. Красным цветом отмечены места отбора образцов.

Fig. 1. Scheme of the Mutnovsky geothermal field by ((Kugaenko, Melnikov, 2006) with additions)). Natural thermal manifestations: 1 — active funnel of the Mutnovsky volcano crater; 2 — Bottom fumarole field of Mutnovsky volcano; 3 — Severo-Mutnovskiy western; 4 — Severo-Mutnovskiy eastern; 5 — Dachnye; 6 — Verkhnemutnovskiy. Geothermal power plants: MgeoES — Mutnovskaya; VMgeoES — Verkhnemutnovskaya. The sampling sites are marked in red.

электроэнергией значительную часть Петропавловск-Елизовской агломерации (Чернев, 2004).

Мутновские электростанции функционируют в сложных климатических и горнотехнических условиях, что естественным образом сказывается на особенностях технологического цикла МГК (Чернев, 2005; Чернев и др., 2019). Одними из главных факторов, осложняющих работу эксплуатационного оборудования являются физико-химические свойства теплоносителя, который характеризуется относительно высокой минерализацией, что в свою очередь приводит к осаждению новообразований на деталях эксплуатационного оборудования (Андрева, Охупкин, 2009; Округин и др., 2017; Чернев и др., 2011, 2018, 2019).

Цель настоящей работы — охарактеризовать вещественный состав хемогенных образований с различных технологических элементов МГК. В дальнейшем это поможет сравнить особенности современной Мутновской ГТС с Мутновским золото-серебро-полиметаллическим месторождением, а также оценить скорости отложения и количество минеральных новообразований, их

влияние на срок службы эксплуатационного оборудования, возможности использования для переработки и получения полезных компонентов для безотходного производства ГеоЭС.

Для этого нами были отобраны различные новообразования с элементов конструкций МГК, представляющие собой наросты с поверхностей сепаратора, турбин и внутренних стенок двух скважин, отложившиеся из ПВС и насыщенных гидротермальных растворов (рис. 2).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РАЙОНА

Объект наших исследований — МГК находится на территории Мутновского геотермального района площадью 750 км², расположенного в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского. Здесь существуют два действующих вулкана — Мутновский (2323 м) и Горелый (1828 м), многочисленные выходы на поверхность горячих и перегретых вод, пара, обширные массивы измененных пород (Белоусов, 1978; Геотермические..., 1986).



Рис. 2. Минеральные новообразования на скважинах Мутновского геотермального комплекса.

Fig. 2. Mineral new growth on the wells of the Mutnovsky geothermal complex.

В геолого-структурном отношении этот геотермальный район принадлежит крупному долгоживущему вулкано-тектоническому центру, в котором с миоцена и до настоящего времени продолжаются магматические, вулканические и гидротермальные процессы (Геотермические..., 1986). В его геологическом строении участвуют вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования, возраст которых изменяется от олигоцена до современного времени. Эти образования в течение длительного времени подвергались интенсивной гидротермальной проработке (Вакин, Наумова, 1995). В нижней части разреза они карбонатизированы, хлоритизированы, цеолитизированы и пиритизированы. В верхней — подверглись аргиллизации, алунитизации и опализации (Геотермические..., 1986).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Новообразования с элементов конструкций МГК были изучены нами в лабораторных условиях на современном оборудовании.

Отбор монофракций проведен с помощью стереомикроскопов Stem 2000 C2 и Discovery V12 (Carl Zeiss, Германия). Минераграфические описания и фотодокументация выполнены на универсальных прецизионных микроскопах Axioskop 40 (Carl Zeiss, Германия) и Eclipse LV 100 pol (Nikon, Япония).

Вещественный состав отложений изучен методом аналитической сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Vega III (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm². Образцы напылялись углеродом. Ускоряющее напряжение 20 кэВ, ток 1 нА, диаметр пучка 5 мкм.

В аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН выполнены 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) и ИК-спектроскопия на спектрометре IRAffinity (Shimadzu, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами изучены отложения, отобранные в четырех точках МГК (рис. 1).

Отложения скважин, образовались в результате излияния на поверхность гидротермальных вод из их устьев. Температура раствора в скважине 1 глубиной 1050 м составляла 263°C, в скважине 2 глубиной 2006 м — 244°C. Эти отложения

представляют собой пористые хрупкие «корки» светлого цвета, иногда с желтыми и коричневыми оттенками.

По данным химического анализа отложений двух скважин основные отличия заключаются в вариациях содержаний SiO₂, Fe₂O₃, MgO и суммарной S. В отложениях скважины 1 содержания Ni, Cr, Cu, Zn, Rb, Sr, La, Pb выше по сравнению со скважиной 2. Концентрации As сопоставимы в отложениях обеих скважин (табл. 1).

Основную массу слагают рентгеноаморфный кремнезем (SiO₂), плагиоклаз (анортит (CaAl₂Si₂O₈)), кальцит (CaCO₃) и волластонит (CaSiO₃). В подчиненном количестве присутствуют вытянутые кристаллы адуляра (KAlSi₃O₈), чешуйки биотита (K(Mg,Fe)₃[AlSi₃O₁₀](OH,F)₂), изометричные зерна галита (NaCl) и барита (BaSO₄) (рис. 3). Также в отложениях скважины 2 установлены сульфаты щелочей — тенардит (Na₂SO₄) и бледит (Na₂Mg(SO₄)₂·4(H₂O)).

Рудные минералы представлены магнетитом (Fe₃O₄), титаномагнетитом (Fe₂TiO₄) и халькопиритом (CuFeS₂). Для магнетита и титаномагнетита типичны сферолиты размером от 10 до 70 мкм (рис. 3б, 3г). Халькопирит образует зерна неправильной формы от 10 до 20 мкм.

Диагностирован самородный алюминий в виде игольчатых фаз, вероятно имеющий техногенную природу в результате коррозии скважин.

Таблица 1. Химический состав отложений скважин по данным рентгенофлуоресцентного анализа

Table 1. Chemical composition of wells sediments according to x-ray fluorescence analysis

вес.%	Скв.1	Скв.2	г/г	Скв.1	Скв.2
SiO ₂	74.80	24.40	As	1840	2059
TiO ₂	0.06	0.05	Rb	110	200
Al ₂ O ₃	3.66	1.44	Ni	130	3
Fe ₂ O ₃	3.65	<0.01	Cr	80	4
FeO	0.86	0.84	Cu	72	26
MnO	0.05	<0.01	Sr	43	25
CaO	1.53	<0.01	Mo	23	24
MgO	0.80	4.72	Zn	21	2
Na ₂ O	4.66	27.00	Ce	20	18
K ₂ O	1.21	3.10	La	18	-
P ₂ O ₅	0.05	0.05	V	9	3
ппп	7.82	10.00	Zr	8	2
Сумма	99.16	71.60	Rb	7	-
S	0.80	10.00	Sc	3	-
			Nb	2	2

Примечание. ппп — потери при прокаливании; прочерк — содержание элемента не определено, аналитики О.В. Белоус, А.А. Кузьмина, Н.И. Чеброва, В.М. Рагулина.

Note. ppp — calcination loss; dash — element content not determined, analysts O.V. Belous, A.A. Kuzmina, N.I. Chebrova, V.M. Ragulina.

Минеральный состав отложений в полной мере согласуется с их химическим составом.

Новообразования, отобранные на турбине, представляют собой хрупкие серые с пористой структурой агрегаты. В их химическом составе установлены высокие содержания Sr, As, Ba, Cu, что отражается в минеральном составе отложений (табл. 2).

Они состоят преимущественно из кремнезема (SiO_2), натечных и волокнистых агрегатов энстатита ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$), включений зерен анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) размером до 30–50 мкм, кристаллов барита (BaSO_4) изометричной формы до 40–70 мкм, неправильной формы агрегатов сфена (CaTiSiO_5) и фторапатита ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) (F до 2.5 вес.%) с наноразмерной вкрапленностью

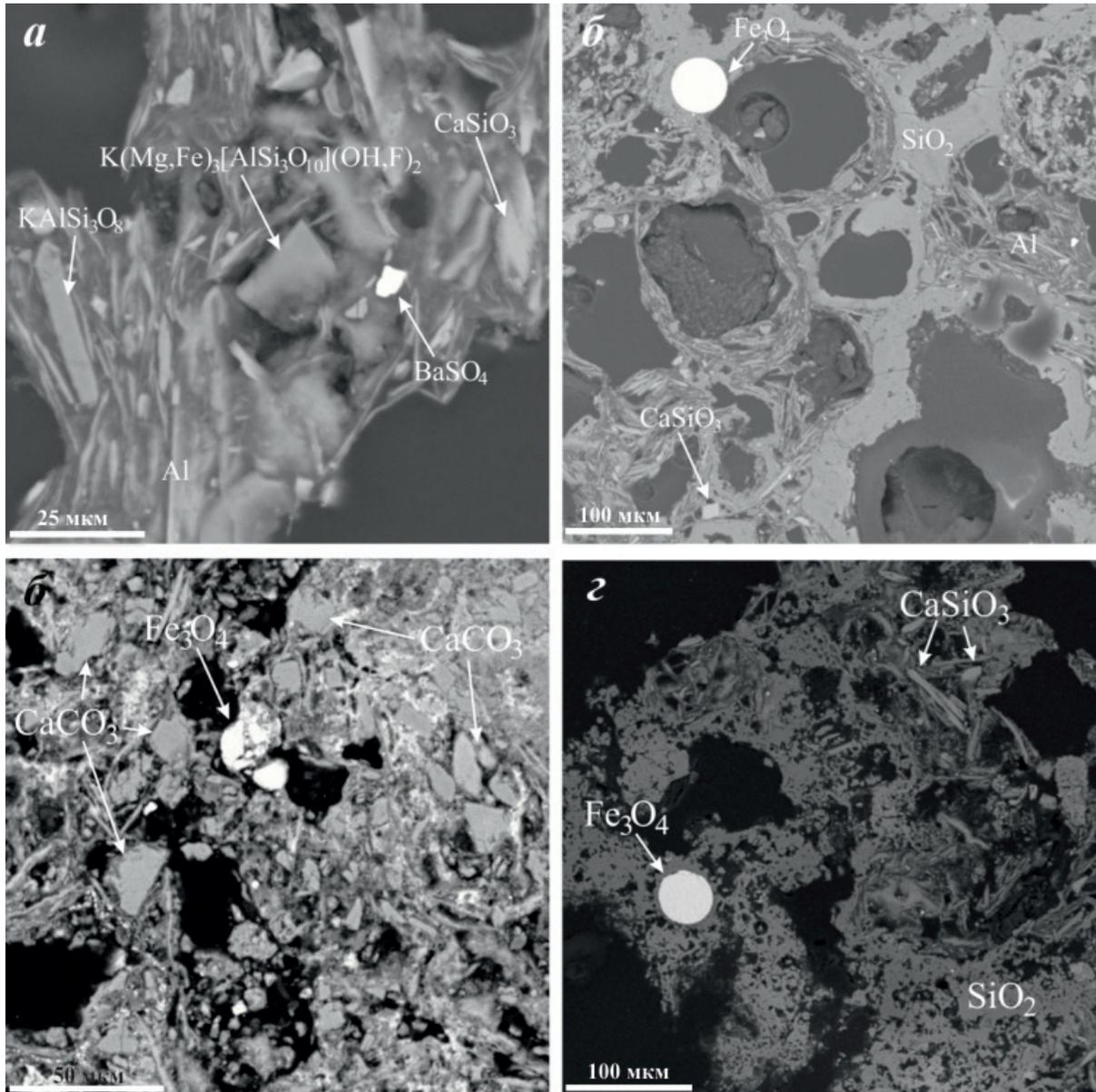


Рис. 3. Минеральный состав отложений из термальных вод скважин: *a* — барит (BaSO_4), адуляр (KAlSi_3O_8), биотит ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$), волластонит (?) (CaSiO_3) и обогащенные алюминием фазы (Al); *б* — сферолит магнетита (Fe_3O_4) в кремнистой массе (SiO_2) с обогащенными алюминием фазами (Al) и волластонитом (?) (CaSiO_3); *в* — зерна магнетита (Fe_3O_4) в массе из обломков кальцита (CaCO_3); *г* — сферолит магнетита (Fe_3O_4) в кремнистой массе (SiO_2) с включениями волластонита (?) (CaSiO_3). Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 3. Mineral composition of sediments from thermal well waters: *a* — barite (BaSO_4), adularia (KAlSi_3O_8), biotite ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$), wollastonite (?) (CaSiO_3) and rich aluminum phases (Al); *b* — magnetite spherulite (Fe_3O_4) in siliceous mass (SiO_2) with rich aluminum phases and wollastonite (?) (CaSiO_3); *v* — magnetite (Fe_3O_4) grain in a mass of fragments of calcite (CaCO_3); *z* — magnetite spherulite in siliceous mass (SiO_2) with inclusions of wollastonite (?) (CaSiO_3). Image in back-scattered electrons.

ХЕМОГЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Таблица 2. Химический состав отложений сепаратора по данным рентгенофлуоресцентного анализа

Table 2. Chemical composition of separator sediments according to x-ray fluorescence analysis

вес.%		г/т	
SiO ₂	65.40	Sr	521
TiO ₂	0.10	As	216
Al ₂ O ₃	12.00	Rb	183
Fe ₂ O ₃	2.18	Ba	150
FeO	1.24	Cu	110
MnO	0.07	Cr	88
CaO	3.46	V	44
MgO	0.56	Zn	29
Na ₂ O	1.71	Pb	29
K ₂ O	1.81	La	27
P ₂ O ₅	0.02	Ce	26
ппп	11.20	Ni	12
Сумма	99.75	Mo	4
S	0.21	Sc	4
		Th	2
		U	2

Примечание. ппп — потери при прокаливании, аналитики А.А. Кузьмина, Н.И. Чеброва, В.М. Рагулина.

Note. ппп — calcination loss, analysts A.A. Kuzmina, N.I. Chebrova, V.M. Ragulina.

рудных фаз. Среди них наибольшим распространением пользуются оксиды железа, образующие сферолиты и агрегаты сложной формы (рис. 4). Вторые по распространенности — сульфиды: пирит (FeS₂), пирротин (Fe_{1-x}S), халькопирит (CuFeS₂) и галенит (PbS). Они встречаются в виде отдельных небольших (5–15 мкм) зерен неправильной формы. Химический состав минералов соответствует стехиометрическому.

Впервые в подобных хемогенных отложениях с турбин ГеоЭС Камчатки обнаружены самородное золото (электрум), теллурид серебра (гессит — Ag₂Te), сульфид серебра (аргентит — Ag₂S) и минералы группы блеклых руд (тетраэдрит ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃). Как правило, это единичные агрегаты сложной формы размерами в первые мкм (рис. 4б).

Наличие в отложениях неравномерно рассеянных обломков и «стружек» состава Fe-Cr, реже Fe-Ni-Cr и Fe-Ni обусловлено фрагментами разрушения деталей турбины (рис. 4б).

Отложения сепаратора МГК представлены светло-серой массой, состоящей из многочисленных глобулей SiO₂ размером от первых мкм до 80–100 мкм с микровключениями рудных минералов (рис. 5). Среди них наиболее распространен пирит в виде кристаллов изометричной формы размером от 5–10 до 40–50 мкм и примесью

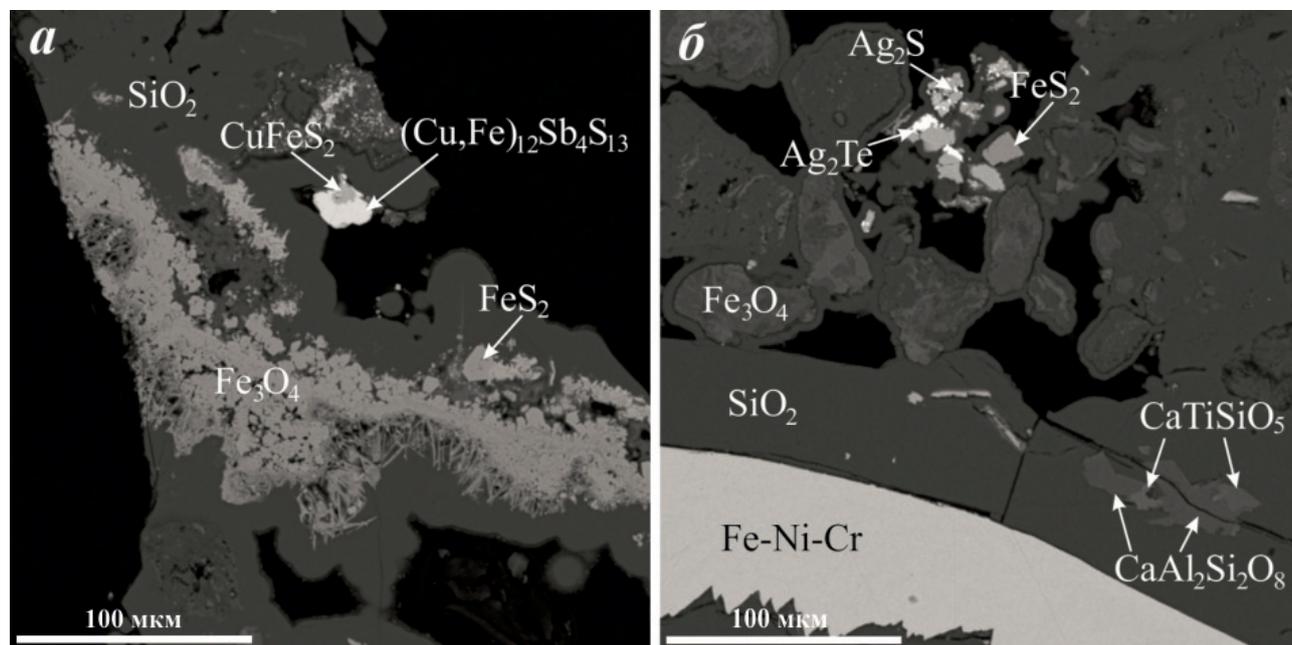


Рис. 4. Минеральный состав новообразований с лопаток турбин: а — прожилки магнетита (Fe₃O₄) в кварце (SiO₂) с включениями пирита (FeS₂), халькопирита (CuFeS₂) и тетраэдрита ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃); б — сростание пирита (FeS₂) с гесситом (Ag₂Te) и аргентитом (Ag₂S) в массе кварца (SiO₂) с включениями анортита (CaAl₂Si₂O₈) и сфена (CaTiSiO₅). Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 4. Mineral composition of sediments taken from turbine blades: а — streaks of magnetite (Fe₃O₄) in quartz (SiO₂) with inclusions of pyrite (FeS₂), chalcopyrite (CuFeS₂) and tetrahedrite ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃); б — pyrite (FeS₂) intergrowth with hessite (Ag₂Te) and argentite (Ag₂S) in the mass of quartz (SiO₂) with inclusions of anorthite (CaAl₂Si₂O₈) and titanite (CaTiSiO₅). Image in back-scattered electrons.

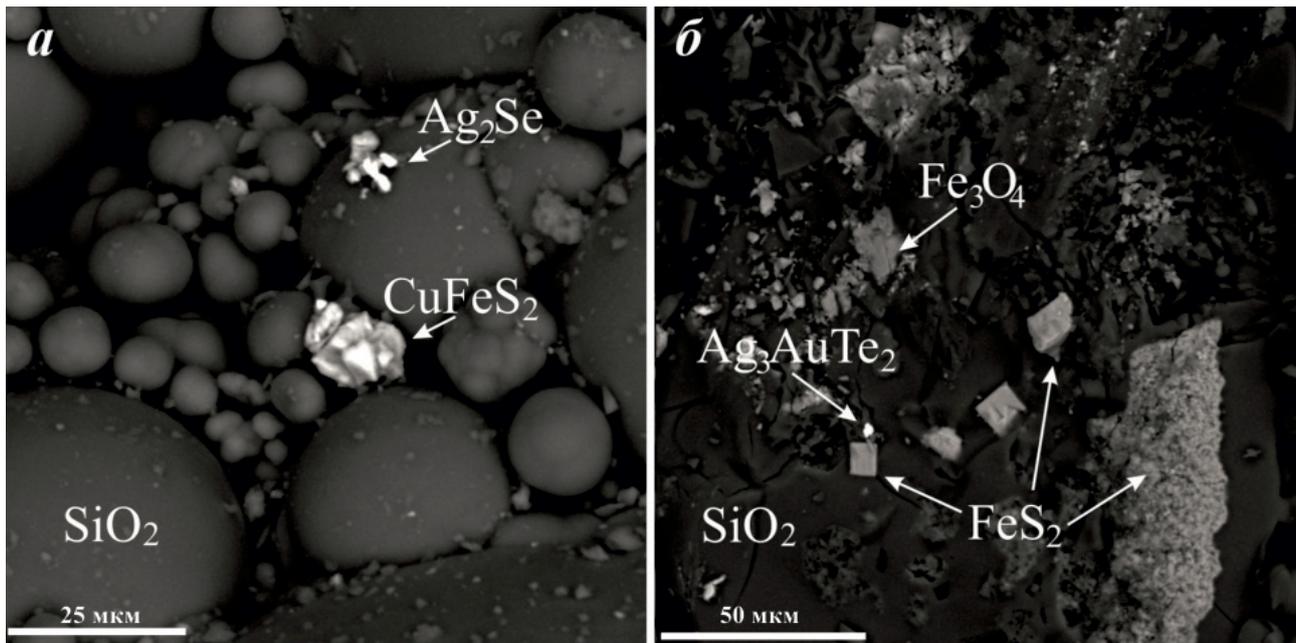


Рис. 5. Минеральный состав отложений сепаратора: *a* — микровключения науманита (Ag_2Se) и халькопирита (CuFeS_2) среди глобулей кварца (SiO_2); *б* — пирит (FeS_2), магнетит (Fe_3O_4) и петцит (Ag_3AuTe_2) в кварце (SiO_2). Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 5. Mineral composition of the separator sediment: *a* — microinclusions of naumanite (Ag_2Se) and chalcopyrite (CuFeS_2) among quartz globules quartz (SiO_2); *б* — pyrite (FeS_2), magnetite (Fe_3O_4) and petzite (Ag_3AuTe_2) in quartz (SiO_2). Image in back-scattered electrons.

мышьяка до 2 вес.%. Халькопирит второстепенный по распространенности минерал. Размер его зерен составляет от первых мкм до 50 мкм. Состав близок к стехиометрическому. Магнетит и титаномагнетит образуют агрегаты неправильной формы до 60–100 мкм в поперечнике.

В подобных отложениях впервые диагностированы теллурид золота и серебра — петцит (Ag_3AuTe_2) и селенид серебра — науманит (Ag_2Se) с размерами частиц до первых микрон (рис. 5).

Таким образом, хемогенные отложения с различных элементов эксплуатационного оборудования МГК отличаются многообразием вещественного состава (табл. 3). В изученных образованиях установлены оксидные соединения кремния (опал, халцедон, кварц, самородный кремний), адуляр, плагиоклазы, карбонаты, галит, барит, биотит, хлориты, тенардит, бледит, фторапатит, энстатит, волластонит. Среди рудных минералов наиболее распространены магнетит, титаномагнетит, халькопирит и пирит. Подчиненное значение имеют пирротин, сфен, галенит и блеклые руды. Впервые в подобных образованиях обнаружены самородное золото (электрум), аргентит, петцит, гессит и науманит.

Наличие самородных железа, олова, цинка, алюминия и соединений Fe-Cr, Fe-Ni-Cr, Fe-Cr, Cu-Fe-Ni, Cu-Zn — результат коррозии конструкций комплекса.

Отложения скважин характеризуются многообразием кислородных соединений, отложения

турбин — широким спектром рудных минералов (в том числе благородных металлов), отложения сепаратора — преобладанием рудных фаз, таких как сульфиды железа и меди, самородные металлы, теллуриды и селениды золота и серебра (первые находки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологический цикл Мутновского геотермального комплекса — своеобразный техногенный «химический реактор», синтезирующий разнообразные минеральные фазы и соединения.

В результате выполненных исследований показано, что из гидротермальных растворов способны отлагаться рудные минералы, в том числе минералы золота и серебра.

Полученные данные о химическом и минеральном составе отложений из гидротермальных растворов Мутновской ГТС, по нашему мнению, могут дополнить сведения и помочь в понимании взаимосвязи современных (горячие источники) и палеогидротермальных (рудные месторождения) систем.

Наличие самородных металлов, теллуридов и селенидов золота и серебра, сульфидов железа и меди позволяет предположить, что деятельность МГК можно сравнить с природными гидротермальными процессами, сформировавшими жильные зоны Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения,

ХЕМОГЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Таблица 3. Минеральный состав техногенных отложений

Table 3. Mineral composition of technogenic sediments

Минералы и соединения	Формула	Скважины	Турбина	Сепаратор
Кварц	SiO ₂	+	+	+
Адуляр	KAlSi ₃ O ₈	+		
Анортит	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	+		
Кальцит	CaCO ₃	+		
Галит	NaCl	+		
Барит	BaSO ₄	+	+	
Энстатит	Mg ₂ Si ₂ O ₆		+	
Волластонит	Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	+		
F-апатит	Ca ₃ (PO ₄) ₃ F		+	
Биотит	K(Mg,Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH,F) ₂	+		
Хлориты	(Mg,Fe) ₃ [(Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂] ₃ (Mg,Fe)(OH) ₂		+	
Тенардит*	Na ₂ SO ₄	+		
Бледит*	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ · 4(H ₂ O)	+		
Магнетит	Fe ₃ O ₄	+	+	+
Титаномагнетит	(Fe,Ti)Fe ₂ O ₄	+		+
Сфен	CaTiSiO ₅		+	
Халькопирит	CuFeS ₂	+	+	+
Пирит	FeS ₂		+	+
Пирротин	Fe _{1-x} S		+	
Галенит	PbS		+	
Тетраэдрит	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃		+	
Петцит	Ag ₃ AuTe ₂			+
Аргентит	Ag ₂ S		+	
Гессит	Ag ₂ Te		+	
Электрум	AuAg		+	
Науманит	Ag ₂ Se			+
Самородные металлы	Fe	+	+	+
	Sn		+	+
	Zn			+
	Al	+		
Сплавы	Cu-Fe-Ni	+		
	Fe-Ni-Cr		+	+
	Fe-Ni		+	+
	Fe-Cr		+	
	Cu-Zn			+

Примечание. *обнаружены только в отложениях скважины 2

Note. *found only in the sediments of well 2

становление которого продолжается в настоящее время. Это может быть использовано при моделировании этапов формирования эпитегрмальных рудных месторождений.

Авторы благодарны В.В. Куликову и А.В. Платонову, обеспечившим высококачественную пробоподготовку образцов для прецизионных исследований.

Список литературы [References]

- Андреева Е.Д., Охупкин Н.С.* К минералогии техногенных отложений Мутновского геотермального комплекса (Южная Камчатка) // *Материалы российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной Году Планеты Земля «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых и студентов».* 6–7 апреля 2009 г. Москва, Изд-во МГУ, 2009. С. 12–14 [*Andreeva E.D., Okhapkin N.S.* On the mineralogy of technogenic deposits of the Mutnovsky geothermal complex (South Kamchatka) // *Materialy rossiyskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy Godu Planety Zemlya «Planeta Zemlya: aktualniye voprosy geologii glazami molodykh uchenykh i studentov».* Moskva: Izd. MGU, 2009. P. 12–14 (in Russian)].
- Белусов В.И.* Геология геотермальных полей в современных вулканических областях. М.: Наука, 1978. 173 с. [*Belousov V.I.* Geology of geothermal fields in modern volcanic areas. Moskva: Nauka, 1978. 173 p. (in Russian)].
- Белусов В.И., Рычагов С.Н., Филиппов Ю.А. и др.* Техногенное образование минералов на геотермальных месторождениях: экологические проблемы эксплуатации и перспективы моделирования образования промышленных руд // *Минералогия техногенеза.* 2009. Т. 10. С. 48–60 [*Belousov V.I., Rychagov S.N., Philippov Yu.A. et al.* Technogenic formation of minerals in geothermal deposits: environmental problems of operation and prospects for modeling the formation of industrial ores // *Mineralogiya tekhnogeneza.* 2009. V.10. P. 48–60 (in Russian)].
- Вакин М.Е., Наумова О.А.* Состав и геолого-структурная позиция измененных пород вулкана Мутновский (Камчатка) // *Руды и металлы.* 1995. № 5. С. 46–53 [*Vakin M.E., Naumova O.A.* Composition and geological-structural position of modified rocks of Mutnovsky volcano (Kamchatka) // *Rudy i metally.* 1995. № 5. P. 46–53 (in Russian)].
- Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм (на примере Мутновского геотермального месторождения). М.: Наука, 1986. 305 с. [*Geothermal and geochemical studies of high-temperature hydrothermal fluids (on the example of the Mutnovsky geothermal field).* M.: Nauka, 1986. 305 p. (in Russian)].
- Кирюхин А.В., Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // *Вулканология и сейсмология.* 2019. № 6. С. 50–65. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019650-65> [*Kirukhin A.V., Sugrobov V.M.* The geothermal resources of Kamchatka and the immediate prospects of their extraction // *Volcanology and seismology.* 2019. V. 13. № 6. P. 389–402. <https://doi.org/10.1134/S0742046319060046>].
- Кугаенко Ю.А., Мельников Д.В.* Проявления техногенеза в геодинамически активном районе Мутновского геотермического комплекса (Южная Камчатка) // *География и природные ресурсы,* № 3. 2006. С. 30–37 [*Kugaenko Yu.A., Melnikov D.V.* Manifestations of technogenesis in a geodynamically active area of the Mutnovsky geoenery complex (South Kamchatka) // *Geografiya i prirodnye resursy.* № 3. 2006. P. 30–37 (in Russian)].
- Округин В.М., Чернев И.И., Фролов А.В.* О роли сейсмичности в эволюции современных гидротермальных рудообразующих систем Камчатки // *Материалы Всероссийской конференции, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика А.Г. Бетехтина «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: Новые горизонты».* 20–22 ноября 2017 г., ИГЕМ РАН, 2017. С. 173–177 [*Okrugin V.M., Chernev I.I., Frolov A.V.* On the role of seismicity in the evolution of modern hydrothermal ore-forming systems of Kamchatka // *Materialy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya rossiyskogo uchenogo akademika A.G. Betekhtina «Osnovnyye problemy v uchenii ob endogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh: Novyye gorizonty».* IGEM RAS, 2017. 173–177 p. (in Russian)].
- Трухин Ю.П.* Геохимия современных геотермальных процессов и перспективные геотехнологии. М.: Наука, 2003. 376 с. [*Trukhin Yu.P.* Geochemistry of modern geothermal processes and promising geotechnologies. Moskva: Nauka, 2003. 376 p. (in Russian)].
- Чернев И.И.* Результаты первого года (2003) эксплуатации Дачного участка Мутновского месторождения парогидротерм. [Электронный ресурс]. *Материалы Международного геотермального семинара, Петропавловск-Камчатский, 9–14 августа 2004 г.* [*Chernev I.I.* Results of the first year (2003) of operation of the Dachny area of the Mutnovsky steam hydrotherm field [Elektronnyj resurs]. *Materialy Mezhdunarodnogo geotermal'nogo seminar, Petropavlovsk-Kamchatsky, 9–14 avgusta 2004 g.* (in Russian)].
- Чернев И.И.* Мутновское геотермальное месторождение: результаты эксплуатации, мониторинг основных параметров, оценка влияния реинженерии на добычные скважины // *Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля–6 августа 2005 г.).* Петропавловск-Камчатский: «ОТТИСК», 2005. С. 106–116 [*Chernev I.I.* Mutnovskoye geothermal field: operating results. monitoring of the main parameters. assessment of the impact of reengineering on production well // *Geotermalnyye i mineralnyye resursy oblastey sovremennogo vulkanizma (materialy Mezhdunarodnogo polevogo Kurilo-Kamchatskogo seminar. 16 iyulya–6 avgusta 2005 g.).* Petropavlovsk-

- Kamchatsky: Izd. «OTTISK». 2005. P. 106–116 (in Russian)].
- Чернев И.И., Зобенько О.А., Округин В.М. и др.* О вещественном составе осадков «глубинных» термальных вод Мутновского геотермального резервуара (Южная Камчатка) // Материалы III Международного научного совещания по проблемам геотермальной вулканологии, 5–9 сентября 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 121–124 [*Chernev I.I., Zoben'ko O.A., Okrugin V.M. et al.* On the material composition of sediments of «dee» thermal waters of the Mutnovsky geothermal reservoir (South Kamchatka) // *Materialy III Mezhdunarodnogo nauchnogo soveshchaniya po problemam geotermalnoy vulkanologii*, 5–9 sentyabrya 2019 g. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2019. P. 121–124 (in Russian)].
- Чернев И.И., Округин В.М., Козлов В.В. и др.* О роли современных методов электронной и микрозондовой микроскопии в изучении техногенных отложений Мутновского геотермального комплекса (Южная Камчатка) // Материалы XXVII Российской конференции «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нано-биоматериалов». Черногородка, 28–30 августа 2018 г. Т. 1. С. 86–88 [*Chernev I.I., Okrugin V.M., Kozlov V.V. et al.* On the role of modern methods of electron and microprobe microscopy in the study of technogenic sediments of the Mutnovsky geothermal complex (southern Kamchatka) // *Materialy XXVII Rossiyskoy konferencii «Sovremennye metody elektronnoy i zondovoy mikroskopii v issledovaniyah organicheskikh, neorganicheskikh nanostruktur i nanobiomaterialov»*. Chernogolovka, 28–30 avgusta 2018 g. V. 1. P. 86–88 (in Russian)].
- Чернев И.И., Округин В.М., Округина А.М. и др.* Отложения «глубинных вод» из скважин Мутновского геотермального месторождения // Тезисы докладов традиционной региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 30 марта – 1 апреля 2011. ИВиС ДВО РАН. 51 с. [*Chernev I.I., Okrugin V.M., Okrugina A.M. et al.* Deposits of «deep water» from the wells of the Mutnovsky geothermal field // *Tezisy dokladov tradicionnoy regionalnoy nauchnoy konferencii, posvyashchyonnoy Dnyu vulkanologa. Vulkanizm i svyazannye s nim processy*. 30 marta – 1 aprelya 2011 g. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN. P. 51 (in Russian)]. http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/documents/tezis_2011.pdf
- Brown K.L., Simmons S.F.* Precious metals in high-temperature geothermal systems in New Zealand // *Geothermics*. 2003. № 32 P. 619–625. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)49-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)49-X)
- Brown K.L.* Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand // *Economic Geology*. 1986. № 81. P. 983–997.
- Clark J.R., Williams-Jones A.E.* Analogues of epithermal gold-silver deposition in geothermal well scales // *Nature*. 1990. № 346. P. 644–645.
- 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*. 1985. № 80. P. 1640–1668. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1640>
- 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.
- Krupp R.E., Seaward T.M.* The Rotokawa geothermal system, New Zealand; an active epithermal gold-depositing environment // *Economic Geology*. 1987. № 82. P. 1109–1129.
- Simmons S.F., Brown K.L., Browne P.R.L. et al.* Gold and silver resources in Taupo Volcanic Zone geothermal systems // *Geothermics*. 2016. V. 59. Pt. B. P. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.009>
- Skinner B.J., White D.E., Rose H.J., Mays R.E.* Sulphides associated with the Salton Sea geothermal brine // *Economic Geology*. 1967. № 62. P. 316–330. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.62.3.316>
- Weissberg B.G.* Gold-silver ore-grade precipitates from New Zealand thermal waters // *Economic Geology*. 1969. № 64. P. 95–108.
- White D.E.* Thermal springs and epithermal ore deposits // *Economic Geology*. 50th Anniversary volume. 1955. № 1. P. 99–154.
- White D.E.* Metal contents of some geothermal fluids // *Symposium on Problem of Post magnetic Ore Deposition*. 1965. V. II. P. 432–443.
- White D.E.* Mercury and base-metal deposits with associated thermal and mineral waters // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 1967. P. 575–631.
- 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. 19 p.
- Williams-Jones A.E., Migdiso A.A., Archibald S.M., Xiao Z.* Vapour-transport of ore metals. // *Water-Rock Interactions, Ore Deposits and Environmental Geochemistry: Special Publication*. 2002. V. 7. Geochemical Society, Houston, TX. P. 279–306.

**CHEMOGENIC SEDIMENTS OF MUTNOVSKY GEOTHERMAL COMPLEX
(SOUTH KAMCHATKA)**

**O.A. Zoben'ko¹, V.M. Okrugin¹, I.I. Chernev², E.Yu. Plutakhina¹,
D.A. Yablokova¹, E.V. Kartasheva¹**

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russia, 683006; e-mail: zobenko@kscnet.ru*

²*PJSC Kamchatskenergo, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683000*

By studying the processes taking place at the operating geothermal stations it is possible to model and understand some features of formation of minerals of geothermal origin, processes of transfer by hydrothermal solutions and concentration of some metals by analogy with the ore-forming processes at the formed deposits. During the release of steam-water mixture and outpouring of water from the wells silica gel is deposited, a number of elements (including noble metals) migrate and accumulate in the sediments. A great role during exploitation of wells, operation of turbines, separators and other structural elements of geothermal stations is played by the chemical composition of the coolant. Because of its high mineralization deposition on various units and parts of equipment occurs, what may complicate the operation of a geothermal plant. We describe the composition of chemogenic deposits on various technological elements of the Mutnovskaya geothermal power plant. Data on sediments sampled in boreholes, on turbine blades and separator are presented. We have revealed a wide variety of such deposits, both oxide compounds and ore phases (from magnetite, chalcopyrite, minerals of faint ore group to native gold, tellurides, selenides and sulfides of gold and silver). We suppose that the processes currently taking place at the Mutnovskoye steam hydrothermal field are similar to the hydrothermal processes that contributed to the formation of vein zones of the gold-silver-polymetallic deposit of the same name.

Keywords: chemogenic sediments, technogenic mineralization, Mutnovsky geothermal complex, minerals.

Поступила в редакцию 22.04.2021 г.

После доработки 21.09.2021 г.

Принята к публикации 27.09.2021 г.