

Васильев В. И. Новые данные о составе метациннабарита и ртутистого сфалерита с изоморфной примесью кадмия // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 7. С. 896–905.

Сергеев Н. Б., Зайков В. В., Лапутина И. П. и др. Золото и серебро в зоне гипергенеза серноколчеданной залежи Гайского месторождения (Южный Урал) // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36. № 2. С. 169–183.

Belogub E. V., Novoselov K. A., Yakovleva V. A. et al. Supergene sulphides and related minerals in the supergene profiles of VHMS deposits from the South Urals // Ore Geology Reviews. 2008. Vol. 33. Is. 3. P. 239–254.

Cabala J., Smieja-Król B., Jablonska M. et al. Mineral components in a peat deposit: looking for signs of early mining and smelting activities in Silesia–Cracow region (Southern Poland) // Environmental Earth Sciences. 2013. Vol. 69. Is. 8. P. 2559–2568.

Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaitis M. A. et al. Gold in the sulfide waste-peat bog system as a behavior model in geological processes // Doklady Earth Sciences. 2013. Vol. 453. Is.1. P. 1132–1136.

Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaitis M. A. et al. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: reprecipitation on natural peat // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 165. P. 8–22.

Pham A. L. T., Morris A., Zhang T. et al. Precipitation of nanoscale mercuric sulfides in the presence of natural organic matter: Structural properties, aggregation, and biotransformation // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. Vol. 133. P. 204–215.

Smieja-Król B., Janeczek J., Bauerek A. et al. The role of authigenic sulfides in immobilization of potentially toxic metals in the Bagno Bory wetland, Southern Poland // Environmental Science and Pollution Research. 2015. P. 1–11.

И. В. Чаплыгин

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, г. Москва
ichap@igem.ru*

Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (Курилы)

Вулкан Кудрявый представляет собой типичный островодужный стратовулкан, сложенный лавами и пирокластикой андезитобазальтового и андезитового состава. Он расположен в кальдере Медвежья на севере о-ва Итуруп (Курилы) и входит в состав небольшого внутрикальдерного вулканического хребта, образованного слившимися конусами, из которых в настоящее время единственный проявляет вулканическую активность. В его кратерной зоне со времени последнего магматического извержения в 1883 г., на площади более 2500 м², проявлена эмиссия высокотемпературных газов. В 1992 г. их температура достигала 940 °С [Таган et al., 1995], а в настоящее время – 850 °С. Валовый вынос газа на вулкане составляет около 30000 т/сутки [Бочарников и др., 1998]. Кудрявый – это один из немногих вулканов, имеющих стационарную высокотемпературную фумарольную систему.

С начала 1990-х годов, когда в пределах фумарольных полей была обнаружена сульфидная рениевая минерализация [Korzhinsky et al., 1994; Знаменский и др., 2005], исследования проводились на вулкане почти каждый год. Анализы конденсатов существенно водных (H₂O > 92 мол. %) фумарольных газов с температурами от 500 до

940 °С показывают, что концентрации металлов в них находятся на уровне мг/т, редко – г/т [Taras et al., 1995; Кременецкий, Чаплыгин, 2010]. Тем не менее, эти газы способны формировать в приповерхностной зоне рудные образования, обогащенные Zn, Cd, In, Re, Mo, Pb, Bi, Au и другими металлами.

Фумарольные поля представляют собой выходы на поверхность горячих трещиноватых зон, по которым газы поднимаются от дегазирующего расплава. Образующиеся по периферии при более низких температурах самородная сера, ангидрит и другие труднорастворимые минералы экранируют эти зоны, поэтому поля четко оконтурены. В пределах полей на глубинах до 2 м наблюдаются рудные образования, слагающие плащеобразные субгоризонтальные тела (рудные коры). Эти тела имеют зональное строение, обусловленное резким падением температуры газов и, соответственно, пород на границе с атмосферой. Грубо можно выделить две зоны: нижнюю сульфидную и верхнюю оксидно-сульфатную. Выделяется четыре крупных поля: Главное (Т до 850 °С), Купол (до 800 °С), Молибденовое (до 760 °С) и Рениевое (до 600 °С). Поля различаются температурным режимом и составом металлоносных сублиматов. В составе рудных образований были установлены частицы Au-Ag-Cu сплава [Yudovskaya et al., 2006] и ряд сульфидов редких элементов, часть из которых была открыта на Кудрявом: рениит ReS_2 , кудрявит $(\text{Cd,Pb})\text{Bi}_2\text{S}_4$, кадмоиндит CdIn_2S_4 , абрамовит $\text{Pb}_2\text{BiSnInS}_7$, знаменскиит $\text{Pb}_4\text{Bi}_4\text{In}_2\text{S}_{13}$, In-содержащие минералы системы ZnS–CdS, рениеносный молибденит и др. (табл.). Концентрации металлов в рудных образованиях достигают (г/т): Au и ЭПГ 10, Re 500, Cd 460, In 150, Bi 800, Mo 4300, Zn 2400, Pb 2800 [Данченко, 1999].

В составе газов преобладают (мол. %): H_2O 92–98, CO_2 и SO_2 ~2, HCl и H_2 ~1. Изотопный состав O и H воды наиболее высокотемпературных конденсатов (δD – до –12 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ – до 11.6 ‰) соответствует составу так называемой «андезитовой» воды – магматической воды островодужных вулканов. Это показывает, что основная часть металлов имеет магматическое происхождение и выносится из магматической камеры в виде летучих соединений (галогенидов, оксигалогенидов и др.). Однако при высоких температурах газы, вероятно, могут выщелачивать металлы из минералов пород, слагающих стенки трещин. Кроме этого, вулканический пар, конденсируясь по периферии фумарольных каналов, образует агрессивные кислые растворы, которые разлагают минералы первичных пород и, попадая в каналы, приносят металлы в газовый поток. Отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в газах составляло 7.7 R_a в 2012 г. и 7.8 R_a – в 2013 г., что является одним из самых высоких значений для островодужных вулканов и говорит о высокой доле мантийного гелия.

Изотопный состав свинца конденсатов и некоторых сублимационных сульфидов вулкана Кудрявый однороден и идентичен составу свинца в магматических породах, слагающих вулкан. Источник свинца лав и высокотемпературного флюида по своим изотопным характеристикам наиболее близок к мантийному источнику базальтов срединно-океанических хребтов Тихого океана. Однако повышенное содержание изотопа ^{208}Pb в лавах и фумарольных газах предполагает участие также источника с более радиогенным составом свинца, например, донных осадков Тихого океана.

Низкорadiогенные $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ изотопные отношения для конденсатов (от 0.122 до 0.152) свидетельствуют о том, что источник значительной части Re и Os имел изотопные параметры, близкие к мантийным ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1296$).

Предполагается, что главным механизмом формирования рудной минерализации в пределах фумарольных полей являются газотранспортные реакции. Их суть заключается в распаде металлоносного газообразного вещества с образованием твердой

Таблица

Рудные минералы высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый

Минералы сублиматов (* , открытые на вулкане)	Фумарольные поля			
	Рениевое 300–600 °С	Молибденовое 400–760 °С	Купол 400–800 °С	Главное 600–870 °С
Самородные элементы				
Золото Au	++			
Сплав (Au,Ag)		++		
Сплав $Cu_3(Au,Ag)_2$			+++	++
Сплав (Cu,Sn)		++		
Сульфиды				
Пирит FeS_2	+++	++	+	+
Пирротин $Fe_{1-x}S$			++	++
Халькопирит $CuFeS_2$				+
Галенит PbS	++			
Сфалерит ZnS		++	++	
Cd-вюртцит $(Zn,Cd)S$		++	++	
Zn-гринокит $(Cd,Zn)S$	+++			
Fe-гринокит $(Cd,Fe)S$	+++			
*Кадмоиндит $CdIn_2S_4$	+		+	+
*Кудрявит $(Cd,Pb)Bi_2S_4$	+			
Козалит $Pb_2Bi_2S_5$	+			
Лиллианит $Pb_3Bi_2S_6$	+			
Канницарит $Pb_4Bi_6S_{13}$	+++			
*Абрамовит $Pb_2BiSnInS_7$			++	
*Знаменскиит $Pb_4Bi_4In_2S_{13}$			++	
Висмутин Bi_2S_3	+			
Молибденит MoS_2	+	+++	+++	++
*Рениит ReS_2	+++			
Тунгстенит WS_2		+		

фазы и другого газообразного вещества, которое уносится дальше потоком газа и может претерпевать химические изменения при последующем понижении температуры. Константа равновесия этих реакций зависит от температуры, и поэтому определенные сублиматы образуются в характерном для них температурном интервале. Частным случаем таких реакций могут быть реакции диспропорционирования, которые приводят к появлению частиц самородных металлов в фумарольной обстановке. Эти реакции обратимы. Твердое вещество осаждается в виде кристаллов, которые могут как дорасти при благоприятных условиях, так и растворяться и исчезать. К исчезновению минерализации может приводить повышение температуры в зоне отложения (смещение изотерм вверх, например, под действием атмосферных условий), приводящее к сдвигу равновесия газотранспортной реакции в области ми-

нерализации в сторону образования первичного газообразного вещества. Длительное действие высокотемпературной фумарольной системы вулкана Кудрявый хорошо объясняется конвекцией в магматической колонне, связывающей близповерхностную область газоотделения и магматическую камеру [Kazahaya et al., 1994].

Проведенные исследования показали, что фумарольная система – это уникальная среда минералообразования, которая характеризуется высокой температурой, высоким температурным градиентом и околоатмосферным давлением. Здесь происходит разделение геохимически родственных элементов (Zn и Cd, Mo и Re и др.), образование собственных минералов редких элементов и формирование фумарольных рудных образований, что свидетельствует о возможности отложения рудного вещества из газовой фазы.

Вулкан Кудрявый характеризуется развитием редкометальной рудной минерализации, однако было бы неверно утверждать, что он уникален в отношении высокой металлоносности газов. Концентрации металлов в газах имеют сопоставимые значения на других вулканах с доступными фумаролами, например на вулкане Горелый (Камчатка) [Чаплыгин и др., 2015] или Эрта-Але (Эфиопия) [Zelenski et al., 2013].

Литература

Бочарников Р. Е., Князик В. А., Штейнберг А. С. и др. Эмиссия газов, рудных и петрогенных элементов на вулкане Кудрявый, остров Итуруп, Курильские острова // Доклады академии наук. 1998. Т. 361. № 5. С. 671–674.

Данченко В. Я. Редкие металлы в рудах Курильских островов. Ю.-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1999. 89 с.

Знаменский В. С., Коржинский М. А., Штейнберг Г. С. и др. Рениит, ReS_2 – природный дисульфид рения из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Записки РМО. 2005. № 5. С. 32–40.

Кременецкий А. А., Чаплыгин И. В. Содержание рения и других редких металлов в газах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова) // Доклады академии наук. 2010. Т. 430. № 3. С. 365–370.

Чаплыгин И. В., Таран Ю. А., Дубинина Е. О. и др. Химический состав и металлоносность магматических газов вулкана Горелый (Камчатка) // Доклады академии наук. 2015. Т. 463. № 1. С. 85–89.

Kazahaya K., Shinohara H., Saito G. Excessive degassing of Izu-Oshima Volcano: magma convection in a conduit // Bulletin of Volcanology. 1994. Vol. 56. P. 207–216.

Korzhinский M. A., Tkachenko S. I., Shmulovich K. I. et al. Discovery of a pure rhenium mineral at Kudriavy volcano // Nature. 1994. Vol. 369. P. 51–52.

Taran Yu. A., Hedenquist J. W., Korzhinskiy M. A. et al. Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril islands // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. № 9. P. 1749–1761.

Yudovskaya M. A., Distler V. V., Chaplygin I. V. et al. Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: evidence from the active Kudryavy volcano, Kurile Islands // Mineralium Deposita. 2006. Vol. 40. P. 828–848.

Zelenski M. E., Fischer T. P., de Moor J. M. et al. Trace elements in the gas emissions from the Erta Ale volcano, Afar, Ethiopia // Chemical Geology. 2013. Vol. 357. P. 95–116.