

ВУЛКАНОГЕННЫЕ ЭПИТЕРМАЛЬНЫЕ, МЕЗОТЕРМАЛЬНЫЕ, ГИПОТЕРМАЛЬНЫЕ (КСЕНОТЕРМАЛЬНЫЕ) МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА И ИХ МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Э.М. Спиридонов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, e-mail: mineral&geol.msu.ru

По типу магматических образований, которые непосредственно предшествуют или сопровождают Au оруденение, выделены гидротермальные рудные формации с Au и золоторудные: плутоногенные формации складчатых областей (золото-кварцевая березит-лиственитовая, медно-порфировая, гумбеитовая), вулканогенные формации складчатых областей и островных дуг (месторождения типа Куроко – Au-Ag-колчеданные, Au-Ag-барит-полиметаллические; Трансильванского типа – эпитеpmальные Au-Ag, Au-Ag-алунитовые, Au-Ag-теллуридные, Au-Ag-селенидные; типа Карлин), вулканогенно-плутоногенные формации (золото-сульфидно-кварцевая березит-лиственитовая...) [Don, 1898; Dunn, 1929; Lindgren, 1933; Emmons, 1937; Schneiderhöhn, 1941; Билибин, 1947; White, 1955; Лазаренко и др., 1963; Бородаевский, 1964; Пляшкевич, 1967; Татаринов, Строна, 1967; Щербаков, 1967; Котляр, 1968; Рожков, 1968; Берман и др., 1972; Шер, 1972, 1974, 1976; Василевский, 1973; Тацуми и др., 1973; Логинов, 1974; Geologie, 1974; Ивенсен, Левин, 1975; Петровская и др., 1976; Casadevall, Ohmoto, 1977; Routhier et al., 1977; Власов и др., 1978; Boyle, 1979; Radtke et al., 1980; Routhier, 1980; Николаева, 1981; Смирнов, 1982; Ramdohr, 1982; Сазонов, 1984; Берзон, Левитан, 1985; Фирсов, 1985; Фогельман, 1985; Geology, 1985; Коваленкер, 1986; Hannington et al., 1986, 1995; Коробейников, 1987; Flemming et al., 1987; Groves et al., 1987, 1993, 2005; Hatchinson, 1987; Heald et al., 1987; Shikazono, Shimizu, 1987; Nesbitt, 1988; Щепотьев и др., 1989; Хомич и др., 1989; Некрасов, 1991; Spiridonov, 1991; Tarkian et al., 1991, 1995; Сахарова и др., 1992; Large, 1992; Mitchell, Leach, 1992; Fouquet et al., 1993; Rushton et al., 1993; Hedenquist et al., 1994, 2000; Hodgson et al., 1995; Kuehns, Rose, 1995; Marcoux, 1995; Sillitoe, 1995; Trudu, Knittel, 1996; Савва и др., 1997; Groff et al., 1997; Obertür et al., 1997; Rubin, Kyle, 1997; So, Yun, 1997; Sherlock et al., 1999; Kerrich et al., 2000; Гамянин, 2001; Cooke, McPhail, 2001; Lang, Baker, 2001; Спиридонов, Плетнёв, 2002]. Известны амагматичные телетермальные рудные формации с Au и золоторудные (золото-сурьмяная, золото-ртутная, золото-селеновая обособленная или в составе пятиметальной U-Ag-Bi-Ni-Co формации) [Крутов, 1959, 1970; Kvaček, 1973; Ершов, 1974; Щеглов, 1976; Индолев и др., 1980; Leblanc, Billard, 1982; Stanley et al., 1990; Виноградова и др., 1995; Olivo et al., 2001].

Вулканогенные месторождения образованы при низком (обычно < 0,08 кб) и сильно изменчивом (до 0,001 кб) давлении. Гидротермальные системы открытого типа, изливающиеся на поверхность суши и на дно морей и океанов, или полуоткрытого типа, так или иначе сообщающиеся с поверхностью, нередко кипящие. Рудообразование и вулканическая деятельность синхронны или чередуются, пути движения гидротерм практически до поверхности прогреты и рудоносные растворы в мало изменённом виде достигают поверхности или приповерхностных участков. Поэтому кристаллизация рудных агрегатов происходит из пересыщенных растворов, чем обусловлено образование тонко расщеплённых кристаллов и сферолитов, "колломорфные" структуры руд. Характерна контрастная зональность месторождений, чередование разно температурных минеральных ассоциаций. В месторождениях от современного до архейского возраста генетически связаны минералы SiO₂, барит, сульфиды, минералы Mn, Au, Ag. Повышенный окислительный потенциал гидротерм обусловлен их контаминацией метеорными водами с кислородом, но и насыщением элементарной серой (зачастую селенистой). Высокая активность S₂ в гидротермах при низком P и повышенной T определили сернокислотный характер растворов. Типичны значительные объёмы предрудных метасоматитов. Обычно это продукты сернокислотного (H₂S-H₂SO₄, HCl-H₂SO₄, HF-HCl-H₂SO₄) выщелачивания: аргиллизиты, вторичные кварциты, опалиты, зодиты, калиевые опропилиты. Рудосопровождающие метасоматиты - от алунитовых до кварц-серицитовых или богатых адуляром. При низких величинах pH и aH₂S/aH₂SO₄ отношение Ag/Au в растворах больше 1 [Cole, Drummond, 1986], что объясняет особенности вулканогенных руд: величина Ag/Au в них обычно более 10 и до 1000, чаще ~ 100.

Минеральный состав руд обусловлен: 1) вулканологической обстановкой (жерловины, трубки взрыва, неки, купола, субвулканические тела; температурные поля и их градиенты; флюидный режим и его градиенты, в том числе кипящие или не кипящие растворы, концентрации CO_2 , SO_2 , H_2S , CH_4 , F, Se, Te.); 2) географической и гидрогеологической обстановками (наземные разной степени обводнённости, подводные пресноводные или в морской среде., - соответственно, сера самородная, сера в сульфатах – алунит, ангидрит, барит, целестин, сера в сульфидах.); 3) составом рудовмещающей среды (хромовая специализация среди гипербазитов – Зодское, ванадиевая среди габброидов – Калгурли.); 4) отчасти длительностью процессов рудоотложения.

Вулканогенные месторождения золота от убого сульфидных до колчеданных обладают сходными минерально-геохимическими особенностями. Характерны высокоглинозёмистые минералы (диккит, пирофиллит, судоит, зунит.); электрум, кюстелит; сульфаты - барит, целестин, ангидрит, кридит; разнообразные минералы Mn, в том числе серии твёрдых растворов магнезит-сидерит-родохрозит и доломит-ферродоломит-кутнагорит; роскоэлит; сложные сульфиды Ag, Bi, Sn, V, Mo, Ge, W, Be, Tl; самородные теллур, олово, висмут, свинец; из теллуридов - нагиагит, костовит, теллурантимонит, колорадоит, музеумит, буххорнит, вулканит, риккардит; сульфоселенотеллуриды и селенотеллуриды Bi – скиппенит.; из блёклых руд - Ag тетраэдрит (фрейбергит), аргентотетраэдрит, голдфилдит; парагенезы пирит+борнит, пирит+гематит, антимонит+теллуриды+сульфоантимониды Pb, диккит+дюмортьерит+верлит+молибденит, электрум+ молибденит, нагиагит+бурнонит+ильванит, теллур+ As-теллурантимонит+костовит+фаматинит, топаз+сера+алунит+голдфилдит, алунит+свинец или стистаит или ганит; повышенные содержания Se в халькогенидах, NH_4^+ в адуляре и алуните, Li в глинистых минералах, F в слюдах; типоморфны минералы, содержащие в одной структурной позиции As, Sb, Te, Sn, Ge (In, Bi, Mo, W), - люционит, станин, колусит, моусонит, германит, хемусит; показательны блёклые руды - твёрдые растворы серий: теннантит - тетраэдрит - аннивит - голдфилдит - хакит - жиродит. Изменчивость параметров рудоотложения – основная причина обилия в вулканогенных месторождениях минералов с резкой, осцилляционной зональностью.

Смена минеральных ассоциаций (рудных фаций) по мере роста активности сульфидной серы до богатых и крайне богатых такой серой (“насеренных”): халькопирит – борнит+пирит – халькозин+ пирит – ковеллин+пирит – фукучилит $\text{Cu}_3\text{FeS}_8\text{-CuS}_2$; теннантит – энаргит, люционит; тетраэдрит – фаматинит. Фукучилит развит в некоторых колчеданных месторождениях Японии. Теннантит – наиболее распространённый минерал мышьяка колчеданных руд. В ряде месторождений очень широко развит энаргит (в колчеданном Челопече, Болгария и эпитегрмальном Квирувилка, Перу) и фаматинит (Кочбулак). Иные минералы – индикаторы высокой и очень высокой активности сульфидной серы: айтенобогардит AuAg_3Te_2 , петровскаит AuAgTe , джонасонит AuBi_5S_4 , развитые в колчеданных месторождениях Рудного Алтая и эпитегрмальных - Индонезии и СВ России.

Минеральные ассоциации (рудные фации), бедные и крайне бедные сульфидной серой включают: гематит, магнетит, аметист, гипогенные алунит–ярозит и гётит, сидерит, кутнагорит, родохрозит, родонит, пироксмангит, ганит ZnAl_2O_4 , цинкит ZnO , халькостибит CuSbS_2 , гудмундит FeSbS , ульманнит NiSbS , нисбит NiSb_2 , самородные свинец, сурьму, олово, стистаит SnSb , ауростибит AuSb_2 , мальдонит Au_2Bi , криддлеит $\text{AuAg}_3\text{TlSb}_{10}\text{S}_{10}$.

Минеральные ассоциации серебра кардинально различны при низкой или высокой активности Te и Se в рудоносных гидротермах; при их низкой активности в рудах масса серебряных сульфосолей, в том числе богатых серебром блёклых руд, вплоть до аргентотетраэдрита; при их высокой активности серебро связано в теллуридах (гессит..) и селенидах (науманнит..).

Типичный минерал вулканогенных месторождений золота – самородный теллур. В участках его развития масса реакционных минералов – теллуристые блёклые руды вплоть до голдфилдита, алтаит, костовит, теллурантимонит, теллуриды меди. Для голдфилдита характерно высоко окисленное состояние не только теллура, но и меди, - вторая кристаллохимическая позиция в этой блёклой руде занята формально двувалентной медью, а не железом и цинком, как в обычных блёклых рудах. Характер продуктов реакций с участием теллура – индикатор интенсивности проявления золото-теллуридной стадии. Реакции с теллуристыми растворами (составы минералов реальные):

Кочбулак. $3 \text{Cu}_{10}\text{Zn}_2\text{AsSb}_3\text{S}_{13}$ (тетраэдрит)+ 3FeS_2 + AuTe_2 (калаверит)+ $5 \text{Te p-p} \rightarrow 6 \text{ZnS}+\text{CuFeS}_2+$ AuCuTe_4 (костовит)+ Sb_2Te_3 (теллурантимонит)+ $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_2\text{As}_3\text{SbS}_{13}$ (теннантит)+ $6 \text{Cu}_3\text{SbS}_4$ (фаматинит)

Кайрагач. $32 \text{Cu}_{10}\text{Zn}_2\text{AsSb}_3\text{S}_{13}$ (тетраэдрит)+ $97 \text{Te p-p} \rightarrow 16 \text{Cu}_{10}\text{Cu}_2\text{As}_2\text{SbTeS}_{13}$ (Те-теннантит)+

$22 \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (теллурантимонит)+ $64 \text{ZnS}+5 \text{Cu}_4\text{Te}_3$ (риккардит) + $36 \text{Cu}_3\text{SbS}_4$ (фаматинит)

Озерновское. $4 \text{Cu}_{10}\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{1.5}\text{As}_{0.5}\text{Sb}_{3.5}\text{S}_{13}$ (тетраэдрит)+ $5 \text{CuFeS}_2+17 \text{Te p-p}+4 \text{Se p-p} \rightarrow 2 \text{Cu}_{10}\text{Cu}_2\text{AsSbTe}_2\text{S}_{11}\text{Se}_2$ (Se – голдфилдит)+ Cu_4Te_3 (риккардит)+ CuTe (вулканит)+ $5 \text{FeS}_2+6 \text{ZnS} +$

$3 \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (теллурантимонит)+ $6 \text{Cu}_3\text{SbS}_4$ (фаматинит)

Обилие в вулканогенных месторождениях S, Se, As, NH_4^+ , F (Tl, Hg, In) обусловлено наличием этих компонентов в вулканических газовых струях и конденсатах из них. Наличие в этих рудах Mn, V, Sn, Ge, Ga, Mo, W, Be частью обусловлено теми же причинами, а в большей степени обусловлено выщелачиванием из вмещающих пород под действием HF-HCl-H₂S-H₂SO₄ растворов, при глубоком разложении силикатов (до "каолинового ядра" и далее до "кремневого скелета") с выносом всех элементов, кроме Si и Ti; темноцветные минералы были источником Mn, V, Sn, полевые шпаты - W, Be, те и другие - Ge, Ga и Mo. Концентрирование в рудах Sn, Be, W, Mo определялось повышенной активностью фтора во флюидах. Обилие серы привело к фиксации большей части этих элементов в сульфидах, включая моусонит $\text{Cu}_6\text{Fe}_2\text{SnS}_8$, гельвин $\text{Mn}_8[\text{BeSiO}_4]_6\text{S}_2$, тунгстенит WS_2 , колусит $\text{Cu}_{26}\text{V}_2(\text{As},\text{Sn},\text{Sb},\text{Ge})_6\text{S}_{32}$ киддкрикит Cu_6WSnS_8 , хемусит $\text{Cu}_6\text{MoSnS}_8$, германит $\text{Cu}_{26}\text{Fe}_2(\text{Ge},\text{As},\text{Ga})_6\text{S}_{32}$, майкаинит $\text{Cu}_{20}(\text{Fe},\text{Cu})_6\text{Mo}_2\text{Ge}_6\text{S}_{32}$, овамбоит $\text{Cu}_{20}(\text{Fe},\text{Cu},\text{Zn})_6\text{W}_2\text{Ge}_6\text{S}_{32}$, галлит CuGaS_2 , индит CuInS_2 ; при пониженной f S₂ возникли касситерит, вольфрамит, аргутит GeO_2 , Ge- и Ga-хлориты, шеелит.

Условность термина эпитеермальные применительно к любым вулканогенным месторождениям Au. Множество месторождений трансильванского типа действительно низкотемпературные, т.е. эпитеермальные. Целый ряд крупных колчеданных месторождений также эпитеермальные, например раннеальпийский золото-медный Челопеч в болгарском Среднегорье, его рудные тела окружают диккитовые аргиллизиты, пиррофиллита нет даже на глубоких горизонтах. Многие другие месторождения трансильванского типа и колчеданные – среднетемпературные, т.е. мезотермальные, сопровождаются пиррофиллитовыми вторичными кварцитами с зунитом, - Озерновское на Камчатке, Кочбулак в Узбекистане и др. Целый ряд вулканогенных гидротермальных месторождений Au –высокотемпературные, т.е. гипотермальные, для них удачен термин А.Ф. Баддингтона – ксенотермальные. Для таких месторождений характерны вторичные кварциты с андалузитом, корундом. Гипотермальным является герцинское Рио-Тинто – крупнейшее колчеданное месторождение Земли с запасами 1 млрд. т, расположенное в Иберийском поясе Испании. В рудах этого FeS_2 -Pb-Zn-Cu гиганта содержится 1 млн. т Sn, масса In, Ge, Ga. Минеральные ассоциации и состав минералов типичных колчеданных руд Рио-Тинто поразительны. Размер гнёзд, богатых касситеритом с 13-37 масс. % олова, до 12 м в поперечнике. Касситерит Рио-Тинто содержит 3 масс. % Fe, 2 % W, 1% Ta, 0.4% In. Такие содержания тантала и вольфрама типичны для касситерита гранитных пегматитов и цвиттеров (наиболее высокоТ образований грейзеновых формаций). Сфалерит содержит 2% Cu, 1.5% In, 1 % Sn. Сфалерит такого состава характерен для наиболее высокоТ кварц-касситеритовых месторождений турмалиновой формации. "Колломорфный" пирит Рио-Тинто богат Со. В рудах развиты решётчатые сростания сфалерита и халькопирита, продукты распада весьма высокоТ твёрдых растворов, а также Ga-Ge -хлорит и Ga-Ge-биотит. Наряду с преобладающими высокотемпературными минеральными образованиями, в Рио-Тинто развиты и низкотемпературные с ртутистыми золотом и электрумом, селенистым галенитом, штрмейеритом.

Месторождения типа Карлин – Лухуми близки к типичным эпитеермальным, расположены в ореолах аргиллизитов. Руды тонкозернистые с пылеватым золотом, баритом, флюоритом, марказитом, золотоносными мышьяковистым пиритом и сернистым арсениопиритом (до 10-14 кг Au /т сульфида), антимонитом. Особенности - формирование под надвигами, при повышенном давлении до 1 кб и более, что препятствовало потере легко летучих As-Sb-Hg-Tl, обилие золото-органических соединений, сульфидов As (аурипигмент, реальгар, вакабаяшиллит, гетчелит...), сульфидов Tl (карлинит, эллисит, лорандит, христит, вейсбергит...) и Hg (киноварь, метациннабарит, галхаит, лаффитит, колорадоит...).

Минерализация близкого типа представлена осадками современных геотермальных систем Бродленс и Ротокава Ново-Зеландской вулканической островной дуги.

Список литературы

- Бабкин П.В., Сидоров А.А.** Золото-серебряные месторождения Северо-Востока СССР // Разведка и охрана нед, 1972. № 10. С. 4-11.
- Берзон Р.О., Левитан Г.М.** Формационная классификация золоторудных месторождений Урала // Тр. ЦНИГРИ. 1985. Вып. 201. С. 75-82.
- Билибин Ю.А.** Металлогения и типы месторождений золота СССР. В кн.: Золотые месторождения Урала и Казахстана. М.: Metallurgizdat, 1947. С. 153-189.
- Ивсенс Ю.П., Левин В.И.** Генетические типы золотого оруденения и золоторудные формации. В кн.: Золотые формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области. М.: Наука, 1975. С. 5-120.
- Спиридонов Э.М.** Типоморфные особенности блёклых руд некоторых плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота // Геология рудных месторождений, 1987. Т. 29. № 6. С. 83-91.
- Спиридонов Э.М.** Условия образования мышьяковистого теллурантимонита в вулканогенных гидротермальных месторождениях золота // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1994. № 4. С. 73-78.
- Спиридонов Э.М.** Майкаинит $Cu_{26}(Fe,Cu)_6Mo_2Ge_6S_{32}$ и овамбоит $Cu_{26}(Fe,Cu,Zn)_6W_2Ge_6S_{32}$ - новые минералы колчеданно-полиметаллических руд // Докл. РАН, 2003. Т. 393. № 6. С. 1-4.
- Спиридонов Э.М., Качаловская В.М., Ковачев В.В.** Германоколусит $Cu_{26}V_2(Ge,As)_6S_{32}$ - новый минерал // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1992. № 6. С. 50-54.
- Спиридонов Э.М., Плетнёв П.А.** Месторождение медистого золота Золотая Гора (о "золото-родингитовой" формации). М.: Научный Мир, 2002. 220 с.
- Филимонов С.В., Спиридонов Э.М., Матвеев А.А., Григорян С.В., Табатабаей С.Х.** Особенности блёклых руд вулканогенных золото-полиметаллических месторождений Ирана и Армении // Зап. ВМО, 2005. Ч. 134. Вып. 3. С. 85-94.
- Шер С.Д.** Эволюция типов и условий формирования месторождений золота в геологической истории // Геология рудных месторождений, 1976. Т. 18. № 5. С. 3-14.
- Щепотьев Ю.М., Вартанян С.С., Орешин В.Ю., Гузман Б.В.** Золоторудные месторождения островных дуг Тихого Океана, М.: Недра, 1989. 244 с.
- Geologie of Kuroko deposits. Tokyo: 1974. 322 p.
- Geology and geochemistry of epithermal systems (eds. Berger B.R., Bethke P.M.). Rev. Econ. Geol. № 2. 1985. 217 p.
- Lindgren W.** Mineral deposits, 4th ed. New York-London: McGraw - Hill Book Company, 1933. 930 p.
- Emmons W.H.** Gold deposits of the World. New York-London: McGraw-Hill Book Company, 1937. 562 p.
- Heald P., Foley N.K., Hayba D.O.** Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits - acid-sulfate and adular-sericite types // Econ. Geol., 1987. Vol. № 82. P. 1-26.
- Kerrick R., Goldfarb R.J., Groves D.I. & Garwin S.** The geodynamics of world class gold deposits: Characteristics, space-time distribution, and origins // Rev. Econ. Geol., 2000. Vol. № 13. P. 501-551.
- Marcoux E.** Gold and Volcanoes : Epithermal gold deposits, a review // C.R. Acad. Sci. Franc. Ser. 2. 1995. Vol. 321. P. 723-735.
- Mitchell A., Leach T.M.** Epithermal island arc metallogenesis, geothermal system and geology. London: Acad. Press, 1992. 457 p.
- Nesbitt B.E.** The gold deposit continuum: a genetic model for lode Au mineralization in the continental crust // Geology, 1988. Vol. 16. P. 1044-1048.
- Schneiderhohn H.** Lehrbuch der Erzlager Stattenkunde. Berlin. 1941. 858 p.
- Spiridonov E.M.** Listvenites and zodites // Internal. Geol. Rev., 1991. Vol. 33. P. 397-407.