

Эволюция флюидов при формировании комплексных Au-Mo(W)-Pb-Zn руд на месторождении порфиривого типа Бугдая (Вост. Забайкалье).

Крылова Т.Л.¹, Киселева Г.Д.¹, Ломм Т.², Коваленкер В.А.¹

¹ИГЕМ РАН, Москва, Россия, T-krylova@ya.ru

²Лаборатория G2R CREGU университета им. А. Пуанкаре, Нанси, Франция

Fluid evolution during the formation of complex Au-Mo(W)-Pb-Zn ores at the porphyry-type Bugdaya deposit (Eastern Transbaikalia)

Krylova T. I.¹, Kiseleva G. D.¹, Lhomme T.², Kovalenker V. A.¹

¹IGEM RAS, Moscow, Russia, T-krylova@ya.ru

²CREGU, UMR G2R Université Henri Poincaré, Vandoeuvre-les-Nancy, France

The results of fluid inclusion studies based on detailed mineralogical investigations evidence derivation of ore-forming fluids of the Bugdaya deposit from ultimate acid differentiates of granitic magma. Pressure drop during fluid ascend to the surface resulted in fluid separation onto low-dense vapor and brine-melt. Temperature and salinity decrease as well as fluid composition change suggest that fluids evolution was caused by interactions with wall rocks as well as by its mixing with meteoric waters. Mo-ores deposited at 550-380°C, from Mg-Na-Cl solution-brines, as well as from gas fluids. Gold-base metal-ores deposited at 360-140° from homogeneous Na-K-Cl(HCO₃) hydrothermal solutions of moderate salinity. Ores deposition was controlled by Eh- evolution of the ore-forming fluid.

Бугдаинское месторождение размещается в центральной части вулcano-купольной структуры радиально-концентрического строения в пределах крупного плутона варисских гранитоидов. В верхнеюрское время гранитоиды были прорваны субвулканическими интрузиями риолит-гранит-порфиров. В пределах месторождения присутствуют единичные дайки аплитов, лампрофиров и диоритовых порфиритов.

Молибденовое оруденение образует залежи, характеризующиеся неравномерным зонально-кольцевым расположением вокруг штока риолит-гранит-порфиров в гидротермально измененных варисских гранитах. Молибденовая и молибден-вольфрамовая минерализация сосредоточена преимущественно в жилах, жильных и прожилковых зонах, в отдельных участках залежи отмечаются штокверки и штокверковые зоны. Основные концентрации Au (от первых до 100-150 г/т и более) приурочены к крутопадающим Au-полиметаллическим жилам и прожилкам, секущим Mo-W минерализацию. Присутствует и единая жильная зона совмещенных комплексных Mo(W)-Au-Pb(Ag)-Zn руд.

В штокверковых и жильных рудах широко распространены пирит, галенит, сфалерит, молибденит, халькопирит, шеелит. Реже встречаются арсенопирит, блеклые руды, магнетит, вольфрамит. Постоянно, но в малых количествах, отмечаются разнообразные висмутовые минералы (айкининовой серии, матильдит-галенитового ряда, системы Cu-Ag-Pb-Bi-S), сурьмяные сульфосоли (полибазит, бурнонит, буланжерит, стибипирсеит), а также теллуриды (алтаит, тетрадимит, гессит, петцит и новая фаза Ag₄Te). Многие минералы образуют по несколько разновидностей, вследствие изоморфного вхождения в них различных элементов. Так в рудах установлены айкинит и Ag-айкинит, (а также еще несколько фаз этого ряда с содержанием серебра до 8%), полибазит, стибипирсеит и Te-полибазит (с содержанием Te около 4%), пирит 5 генераций и мышьяковистый пирит, выявлено большое разнообразие составов блеклых руд и т. д. Серебро образует девять собственных минералов, (в том числе и самородное серебро), а также накапливается в виде значительных изоморфных примесей в сульфидах и сульфосолях поздних ассоциаций. Соединения Au, особенно в богатых рудах, отличаются крайне большим диапазоном пробности (962-223). Основным жильным

минералом является кварц. Наблюдаются также халцедон, карбонаты, слюды, турмалин, калиевый полевой шпат флюорит, барит, смектит, каолинит,

Выделено четыре стадии формирования гидротермальной минерализации: дорудная (в том числе и магнетитовая подстадия), кварц-молибденитовая, золото-полиметаллическая и послерудная. Минерализация дорудной стадии проявилась после внедрения субвулканического штока риолит-гранит-порфиров в виде калишпатизации и интенсивного окварцевания. Вслед за ними сформировалось W-Mo оруденение кварц-молибденитовой стадии. Образование жил золото-полиметаллической стадии, сопровождаемое серицитизацией и пиритизацией боковых пород, происходило после изменения регионального плана тектонических деформаций. Завершался рудообразующий процесс отложением халцедон-карбонатных жил и прожилков.

Индивидуальные флюидные включения (ФВ) изучены в минералах дорудной, кварц-молибденитовой и золото-полиметаллической стадий. Микротермометрия проводилась в термокриокамере Linkam-THMSG-600 в ИГЕМ РАН (Москва, Россия). Определены температуры гомогенизации ($T_{\text{гом}}$), температуры плавления эвтектики ($T_{\text{эвт}}$) температуры плавления льда и растворения твердых фаз. При интерпретации результатов было принято, что $T_{\text{эвт}}$ от -20.8 до -35°C характеризуют хлоридные растворы с преобладанием Na, ниже -52°C – Ca-хлоридные растворы (Crawford, 1981), а в интервале от -35 до -49°C – существенно Mg-Na-хлоридные растворы (Spenser et al., 1990). Как правило, $T_{\text{эвт}}$ имеют значения ниже теоретических, поэтому следует предполагать присутствие в растворах дополнительных катионов. Температуры флюидов определялись по $T_{\text{гом}}$ водно-солевых ФВ. Как будет показано ниже, фазовый состав ФВ в минералах ранних стадий, указывает на гетерогенность флюидов в высокотемпературной области. В этом случае $T_{\text{гом}}$ соответствуют температурам минералообразования. (Наумов В.Б., 1982). В остальных случаях приведенные в тексте температуры являются минимальными температурами природных процессов. Газовая фаза ФВ, количество ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} и HSO_4^- в растворах ФВ и состав некоторых твердых фаз определялись методом Раман-спектроскопии (РС) в лаборатории G2R CREGU Университета им. А. Пуанкаре (г. Нанси Франция). Концентрация и плотность флюидов рассчитывались с помощью программы FLINCOR (Brown, 1990). Значения концентраций приводятся в мас. % экв. NaCl. Результаты измерения $T_{\text{гом}}$, $T_{\text{эвт}}$ и расчетов концентрации растворов ФВ приведены на рис. 1.

В процессе роста кварца дорудной стадии были захвачены как расплавные так и флюидные включения. Такое сочетание включений не характерно для гидротермальных жил. Оно указывает на практически одновременный захват расплава, газового и водно-солевого флюидов. Следовательно, кварцевые прожилки начинали формироваться в заключительный период кристаллизации магматического очага.

Расплавные включения нами не изучались. Среди флюидных включений преобладают однофазные газовые ФВ (иногда с тонкой каймой раствора). В общих зонах роста с газовыми ФВ, т.е. синегенетичные им, встречаются многофазные ФВ. Они содержат газ, раствор и один или несколько кристаллов галита (показатель преломления близок таковому кварца) занимающих от 20 до 60% объема. В некоторых кристаллах галита наблюдались мелкие вкрапления черной непрозрачной твердой фазы. Двухфазные ФВ (газ + раствор) встречаются редко.

По данным изучения флюидных включений дорудный кварц кристаллизовался в температурном интервале от 570 до 280°C . При температурах выше 400°C флюидная система была гетерогенна, о чем свидетельствуют сингенетичные многофазные и газовые ФВ. Концентрация и плотность водно-солевого Na-Ca-Mg-хлоридного флюида достигали уникально высоких значений $70.5-49$ мас. % и $1.5-1.2$ г/см³. Газовый флюид был низкоплотным (фазовые изменения в газовых ФВ при криометрии не наблюдались, лишь в единичных включениях было отмечено замерзание CO_2). При температурах ниже 400°C кварц отлагался из гомогенного Na-Cl флюида ($C=7-19$ мас. %, $D=0.9$ г/см³). Низкоплотный газовый флюид и газовая фаза водно-солевого флюида имели водно-углекислотный состав (100 мол. % CO_2). Одно из газовых ФВ содержит молекулярный

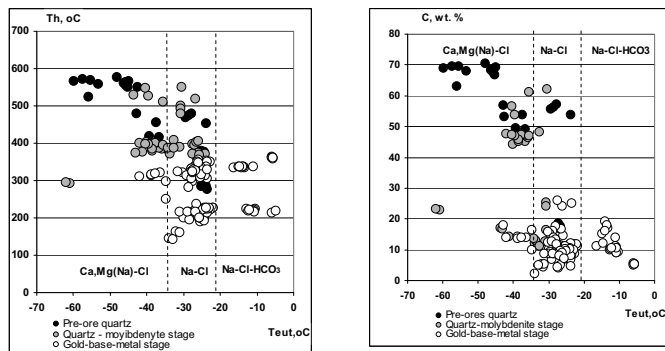


Рис. 1. Температуры гомогенизации, температуры плавления эвтектики и концентрации растворов флюидных включений в минералах различных стадий месторождения Бугдая.

Fig. 1. The homogenization temperatures, the melting eutectic temperatures and fluid salinity of fluid inclusions in different stages minerals at the Bugdaya deposit.

формировалась в том же интервале 550-290°C, что и дорудный кварц, но состояние и состав флюидов были несколько иными. При температурах 550-380°C существовала гетерогенная среда, состоящая из низкоплотного газового флюида и высокоплотного Mg-Na-(Ca)- бикарбонатно-хлоридного рассола (C=62.0-45.7 мас. %, D=1.3-1.1 г/см³). В этот же период существовал и низкоплотный Na-Mg-хлоридный флюид с T = 530-500°C, состояние которого было близко к критическому (C=17-16 мас.%, D=0.5 г/см³). Не исключено, что окологритический флюид поступал в минералообразующую систему периодически. При температурах ниже 400°C минералообразование происходило из гомогенного хлоридно-бикарбонатного гидротермального флюида с переменным соотношением Ca, Na и Mg и концентрацией 23-7 мас. %. Основным газовым компонентом всех типов ФВ является углекислота с небольшой примесью N₂ (>1 мол. %). Одно из газовых ФВ содержит H₂S.

Кристаллы непрозрачного рудного минерала, иногда в виде пластинок с гексагональным сечением, морфология которых близка к морфологии молибденита обнаружены в многофазных, газовых и двухфазных ФВ.

В жильных минералах Au-полиметаллической стадии обнаружены только двухфазные ФВ. Минерализация формировалась в широком температурном интервале 360-140°C из флюидов Na(K)-хлоридного или Na(K)-бикарбонатно-хлоридного состава (методом РС сульфат- и бисульфат - ионы не обнаружены). Соленость флюидов варьировала от >26 до 2 мас. %, плотность повышалась от начала к концу процесса от 0.6 до 0.9 г/см³. В газовой составляющей флюидов преобладала CO₂. Присутствовали H₂ и N₂ (> 1.5 мол. %).

Условия отложения золота были определены по псевдотрихитным ФВ в трещинках, окружающих вкрапления самородного золота в кварце и халькопирит с вкраплениями золота во флюорите. Установлено, что халькопирит с Au во флюорите кристаллизовался при температурах около 330-320°C из слабосоленых (6.7-4 мас. %) Na-хлоридных флюидов при появлении в газовой составляющей H₂ и N₂. В кварце отложение Au происходило при температурах 225-200°C из более соленых (11-6.9 мас. %) Na-(бикарбонатно)-хлоридных флюидов, содержащих только N₂.

Проведенные исследования показали, что при значительном изменении состояния, состава и концентрации в газовой фазе флюидов основным компонентом была углекислота. Примесь других газов не превышала 1.7 мол. %, но состав их менялся вполне закономерно. Флюиды при отложении дорудного кварца содержали только CO₂ и молекулярный O₂, который, очевидно, характерен для периода формирования кварц-

O₂. Рудная фаза в галите многофазных ФВ, по данным РС, является оксидом железа.

В кварце кварц-молибденитовой стадии также преобладают однофазные газовые ФВ. Так же, как и в дорудном кварце встречаются многофазные ФВ с кристалл-лами галита, часто содер-жащими вкрапления черной рудной фазы. Эти ФВ синге-нетичны газовым или существенно газовым ФВ, что свидетельствует о гетерогенности флюидной системы. Двухфазные ФВ встречаются чаще, чем в дорудном кварце. Минерализация этой стадии

магнетитовой минерализации. При отложении молибденита Eh-потенциал флюидов резко менялся, о чем свидетельствует появление N_2 и H_2S . При отложении раннего золота во флюидах присутствовали N_2 и H_2 , позднего – N_2 . Можно полагать, что основным фактором рудоотложения являлось изменение Eh-состояния рудообразующих флюидов.

Расплавные включения в дорудном кварце свидетельствуют о том, что рудообразующие флюиды имели магматогенное происхождение. Молекулярные H_2 и N_2 , обычно вместе с CH_4 , обычно присутствуют в составе флюидов различных месторождений. Их источником, как правило, являются вмещающие породы. По-видимому, появление восстановителей обусловлено взаимодействием флюидов с вмещающими породами, а также смешением магматогенных и метеорных вод. Близкие температуры, а также присутствие оксида железа в ФВ дорудном и кварц-молибденитовом кварце могут указывать на то, что выделение стадий для начального периода минералообразования имеет условный характер.

Присутствие молибденита в вакуолях и газовых, и водно-солевых и двухфазных ФВ свидетельствует о том, что отложение его происходило как из водно-солевых флюидов различной солёности, так и из газового флюида. Возможность переноса молибденовой кислоты в паровой фазе флюидов доказана экспериментально (Tingle, 1984).

Молекулярный O_2 ранее обнаруживался в составе флюидов только на урановых месторождениях, где он вместе с H_2 является продуктом радиолиза воды и/или органического вещества. Молекулярный O_2 при отсутствии урановой минерализации нами обнаружен впервые и упоминания об его находках в известной нам литературе не встречалось.

Исследования проводились в рамках базовой темы ИГЕМ РАН «Состав, строение и условия формирования руд крупных эндогенных месторождений благородных и цветных металлов» при поддержке РФФИ, грант 07-05-00517.

Литература

- Коваленкер В.А., Крылова Т.Л., Киселева Г.Д., Кигаи И.Н. Условия образования Au-Mo(W)-Pb-Zn руд атипичного порфириового Бугдаинского месторождения // Доклады РАН. 2007. Т. 416. №1. С. 96-99.
- Наумов В.Б., Самойлович Л.А. Практические аспекты использования метода гомогенизации // В кн. «Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений». М. Недра. 1982. С. 141-145.
- Crawford M.L. // Fluid inclusions: Applications to Petrology // Mineral. Association of Canada. 1981. Short Course. Handbook 6 P. 75-100.
- Spenser R.J., Moller N., Weare H. The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Cl-SO₄ system below 25°C // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1990. V. 54. №3. P. 575-602/
- Brown P.E. FLINCOR: // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 101-127.
- Tingle T.N. and Fenn P.M. Transport and concentration of molybdenum in granite-molybdenite systems: effects of fluorine and sulfur // Geology. 1984. №12. P. 156-158.