

## Часть 5. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

**В. П. Молошаг**

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург  
moloshag@igg.uran.ru*

### **Генетические аспекты формирования теллуридов и сульфосолей на примере колчеданных месторождений Урала**

Руды колчеданных месторождений Урала содержат богатый набор теллуридов, количество и разнообразие которых приближается к золоторудным месторождениям. Если обратиться к сульфосолям, то ведущим их представителем в количественном отношении являются блеклые руды, кристаллические структуры которых допускают широкие диапазоны изменения содержаний мышьяка, сурьмы, цинка и железа, включая примеси теллура, висмута, серебра и ртути. Рудные тела колчеданных месторождений или их отдельные фрагменты, в которых встречаются теллуриды или сульфосоли характеризуются повышенными содержаниями золота и серебра. Теллуриды и сульфосоли способны концентрировать в себе примеси благородных металлов. Наряду с прикладным значением названные минералы представляют интерес для изучения условий переноса и накопления золота и серебра в процессах формирования руд.

В последние годы получены новые материалы по золотосодержащим рудам Тарньерского месторождения, которое залегает в породах риолит-базальтовой формации на северо-восточном контакте Помурской диоритовой интрузии. Колчеданные руды и вмещающие их породы были подвержены интенсивному контактовому метаморфизму, который привел к обогащению золотом и серебром вкрапленной сульфидной минерализации метаморфизованных до роговиков вмещающих пород, разделяющих близко залегающие рудные тела. По характеру минеральных ассоциаций роговики отвечают амфиболитовой, вплоть до гранулитовой, ступени метаморфизма [Медноколчеданные..., 1988]. За редкими исключениями сплошные медные и медноцинковые руды характеризуются рядовыми содержаниями благородных металлов, что является еще одним из следствий контактового воздействия на них диоритовой интрузии. Образование золоторудной минерализации Тарньерского месторождения связано с ретроградной стадией контактового метаморфизма. В золотосодержащих вкрапленных рудах отмечаются самородное золото и теллуриды: гессит, алтаит, раклиджит, вольтинскит, цумоит, включая сульфосоли [Белогуб и др., 2010]. Наличие пар сосуществующих пирротина и пирита, самородного золота и сфалерита, а также алтаита и гессита, а также их состав позволили получить оценки таких физико-химических параметров формирования этих руд, таких как температура, летучести серы и теллура:  $T = 440\text{--}445\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\log f_{S_2}$  от  $-5.8$  до  $-5.5$ ,  $\log f_{Te_2}$  от  $-8.8$  до  $-9.1$ . Приведенные значения температур, отвечающих амфиболитовой и гранулитовой стадии метаморфизма, подтверждают связь золотосодержащих руд с ретроградной стадией метаморфизма.

Геологические данные и результаты экспериментальных исследований говорят о предпосылках появления сульфидных расплавов в пределах разведанного объема месторождения. Данный механизм эффективно «срабатывает», если сульфидные руды содержат минералы, отличающиеся низкими температурами плавления по сравнению с породообразующими силикатами. В этих условиях рудообразующие сульфиды могут разогреваться выше температуры плавления сульфидной эвтектики. По сравнению с сульфидами, теллуриды и сульфосоли отличаются более низкими температурами плавления. Благодаря этому обстоятельству такие элементы как мышьяк, сурьма, висмут, теллур, селен, таллий способны накапливаться в низкотемпературных эвтектических расплавах, из которых кристаллизуются легкоплавкие сульфосоли и теллуриды [Медноколчеданные..., 1988].

Рудовмещающие толщи большинства колчеданных месторождений Урала подвергались региональному метаморфизму зеленокаменной и пренит-пумпеллиитовой фации, температурные условия которых не достаточны для плавления сульфидов. Процессы перекристаллизации и дифференциации вещества проходили метасоматическим путем в пределах объема рудных тел, залежей, подвергающихся хрупким деформациям и сопровождающихся процессами тектонического разлинзования. Теллуриды, также как и самородное золото, развиваются совместно с халькопиритом, галенитом, сфалеритом и теннантитом. Развитию теллуридов в прожилково-вкрапленных рудах и рудных столбах Сафьяновского месторождения способствовало также незначительное количество блеклых руд, которые к тому же замещались минералами энаргит-фаматинитового ряда, практически не содержащими изоморфной примеси теллура.

Исследования золоторудных и колчеданных месторождений Австралии и Канады показали, что появление сульфидного расплава связано с пиком метаморфизма в условиях гранулитовой или амфиболитовой фации. В условиях гранулитовой фации первые порции сульфидного расплава появляются при температуре выше 800 °С, если состав руд отвечает тройной эвтектике  $PbS + FeS + (Zn,Fe)S$ . При добавлении к данной системе халькопирита, эвтектический расплав  $PbS + FeS + (Zn,Fe)S + CuFeS_2$  появляется при 700 °С. Появление сульфидного расплава в условиях, отвечающих амфиболитовой фации, возможно при 500 °С и наличии арсенопирита в колчеданных рудах, что можно представить в виде следующей реакции:  $FeAsS + FeS_2 = Melt + FeS$  [Tomkins et al., 2007]. Наличие в рудах достаточного количества сульфосолей меди, свинца, и, в первую очередь, висмута снижает температуру плавления. Поступление этих элементов в расплав возможно за счет очистки пирита путем его плавления, который способен накапливать примеси упомянутых элементов как ведущий рудообразующий минерал колчеданных руд на стадии отложения и диагенеза. Такие расплавы способны существовать вплоть до температуры кристаллизации висмута (271 °С).

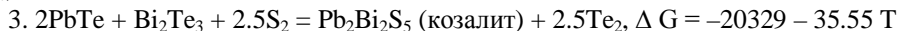
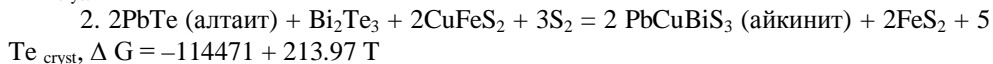
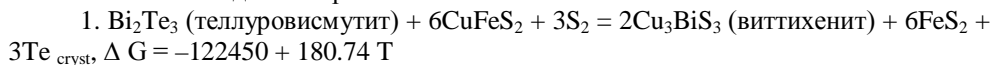
Генерация сульфидных расплавов под воздействием контактового и регионального метаморфизма на колчеданные руды допускается для месторождений имени 50-летия Октября и Маукского, которые отличаются широким распространением пирротиновых и пирротинсодержащих руд. Рудные залежи и вмещающие породы месторождения им. 50-летия Октября подверглись контактовому метаморфизму интрузий плагиогранитов и гранодиоритов, который приводил к формированию роговиков кордиерит-бититового, кордиерит-биотит-антофиллитового и кордиерит-антофиллитового состава по надрудным спилитам, а также к наложению кордиерита, биотита,

антофиллита на подрудные метасоматиты и колчеданные руды. Регрессивная стадия фиксируется замещением продуктов прогрессивной стадии халькопиритом, магнетитом, пиритом, арсенопиритом, молибденитом, галенитом, карбонатами, кварцем и серицитом. В эту же стадию кристаллизовались самородный висмут и висмутин [Молошаг, Викентьев, 2007]. На Маукском месторождении пострудные метаморфические изменения проходили в условиях альбит-эпидот-амфиболитовой фации. Они относятся к высокобарическому метаморфизму линейных зон [Медноколчеданные..., 1988].

Многие золоторудные месторождения, наряду с теллуридами, характеризуются богатым набором сульфосолей висмута, серебра, свинца, сурьмы, ртути, которые также как и теллуриды названных металлов способны накапливать примесь золота. Основные объемы колчеданных руд Урала формировались в условиях, благоприятных развитию блеклых руд, количество которых в отдельных случаях может составлять до 3 % от объема сульфидов. Естественно, что наличие блеклых руд не способствовало широкому развитию остальных минеральных видов сульфосолей.

На колчеданных месторождениях блеклые руды являются одним из ключевых промежуточных «контейнеров» теллура, где, в отличие от теллуридов, он присутствует в состоянии  $\text{Te}^{2+}$  [Мозгова, Цепин, 1983]. Переход теллура в более высокие степени окисления  $\text{Te}^{4+}$  и  $\text{Te}^{6+}$  связан с повышением потенциала кислорода. Разрушение структуры блеклых руд за счет окисления трехвалентных мышьяка и сурьмы проявляется в замещении их минералами ряда энаргит-фаматинит, где перечисленные элементы пятиявалентны. В современных подводных сульфидных постройках теллуриды практически не встречаются [Бортников, Викентьев, 2005]. Богатый набор теллуридов, включая голдфилдит и самородный теллур, в недавно открытых фрагментах труб гидротермальных построек, образовался в восстановительных условиях диагенеза и литификации рудовмещающих толщ [Масленников, 2006].

Взаимоотношение сульфосолей и теллуридов показано на примере твердофазных реакций замещения с участием паров серы  $\text{S}_2$  и теллура  $\text{Te}_2$ , где  $\Delta G$  – рассчитанные значения свободной энергии Гиббса.



Первые две реакции подтверждаются находками самородного теллура в рудах Сафьяновского и других месторождений [Масленников, Масленникова, 2007]. Образование сульфосолей возможно и без появления самородного теллура, примером чему может служить находка козалита в колчеданных рудах Тарньерского месторождения. В зависимости от соотношения давления (летучести) паров теллура и серы в конкретной геологической обстановке рассмотренные реакции могут протекать и в обратном направлении. Литературные данные по минеральному составу золоторудных месторождений, представленные в виде классических таблиц «минерал–стадия», в большинстве случаев показывают тенденцию разобшения теллуридов и сульфосолей свинца, висмута и серебра. Значительно реже наблюдается их совмещение во времени и пространстве. Превалирующее развитие теллуридов или сульфосолей оп-

ределяется соотношением давления паров серы и теллура. Совмещение названных групп минералов, очевидно, обусловлено равновесным соотношением давления паров серы и теллура.

Минеральный состав барит-сульфидных гнезд и жил Сафьяновского месторождения обнаруживает черты сходства с современными проявлениями подводной гидротермальной минерализации. В этих образованиях, наряду с сульфосолями, отмечаются повышенные содержания примесей мышьяка в пирите из внутренней зоны развития барит-сульфидной минерализации, что свидетельствует о потенциальной возможности накопления, точнее связывания золота с пиритом [Мурзин и др., 2010].

На основе результатов выполненных исследований и анализа литературных данных можно сделать следующие выводы.

1. Для руд колчеданных месторождений Урала возможны три варианта формирования теллуридной минерализации: сульфидного анатексиса, пострудных метасоматических процессов и в связи с исходной локализацией благородных металлов, теллура и других элементов в сульфидных трубах.

2. На примере месторождений Тарньерское, а также имени 50-летия Октября и Маукское, которые испытали воздействие метаморфизма на уровне гранулитовой и амфиболитовой фаций, показана возможность образования теллуридов и сульфосолей из сульфидных расплавов за счет плавления ранее отложенных гидротермально-осадочных колчеданных руд.

3. На большей части месторождений Урала развитие теллуридов связано с пострудными метасоматическими процессами перекристаллизации колчеданных руд.

## Литература

*Белогуб Е. В., Молошаг В. П., Новоселов К. А., Котляров В. А.* Самородный висмут, цумоит и свинцовистая разновидность цумоита из Тарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал) // Записки РМО. 2010. № 6. С. 108–119.

*Бортников Н. С., Викентьев И. В.* Современное сульфидное полиметаллическое минералообразование в Мировом океане // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 1. С. 16–50.

*Масленников В. В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2006. 384 с.

*Масленникова С. П., Масленников В. В.* Сульфидные трубы палеозойских «черных курильщиков». Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2007. 312 С.

Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение / *В. А. Прокин, Ф. П. Буслаев, М. И. Исмагилов и др.* Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 240 с.

*Мозгова Н. Н., Цепин А. И.* Блеклые руды. М.: Наука, 1983. 280 с.

*Молошаг В. П., Викентьев И. В.* Благородные металлы в рудах колчеданных месторождений Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование // Сборник научных трудов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 810–839.

*Мурзин В. В., Варламов Д. А., Ярославцева Н. С., Молошаг В. П.* Минералогия и строение барит-сульфидных жил Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Уральский минералогический сборник № 17. Миасс–Екатеринбург: УрО РАН. 2010. С. 12–19.

*Tomkins A. G., Pattison D. R. M., Frost B. R.* On the initiation of metamorphic sulfide anatexis // Journal of Petrology. 2007. Vol. 48. № 3. P. 511–535.