

## ЧАСТЬ 4. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

**В. П. Молошаг<sup>1</sup>, И. В. Викентьев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург  
moloshag@igg.uran.ru*

<sup>2</sup> – *Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН, г. Москва*

### **Платиноиды и золото в колчеданных рудах Урала**

За последние десятилетия в отечественной и зарубежной литературе неоднократно поднимается вопрос о наличии элементов платиновой группы (ЭПГ) в рудах колчеданных месторождений. Практический интерес к ЭПГ очевиден. Однако степень проработки данного вопроса пока недостаточна. Одним из существенных направлений его решения является разработка аналитических методов определения ЭПГ в рудах колчеданных месторождений, которая достигла приемлемого уровня только в последние десятилетия прошлого века. Целью предлагаемой статьи является разработка минералого-геохимической модели распределения платиноидов и золота в рудах колчеданных месторождений на основе привлечения литературных данных по экспериментальным исследованиям условий их переноса гидротермальными растворами в пределах изменений термодинамических параметров образования природных минеральных ассоциаций.

Выполненные нами исследования распределения ЭПГ и золота в рудах Сафьяновского, Тарньерского и Узельгинского месторождений показали более низкие концентрации платиноидов по сравнению с золотом и подтвердили преобладание палладия и платины над остальными платиноидами. Преобладание золота над платиноидами ранее отмечалось другими исследователями на отечественных и зарубежных колчеданных месторождениях. Особый интерес представляет то, что данная тенденция прослеживается для сульфидных руд из современных подводных гидротермальных построек. Соотношение концентраций золота и платиноидов практически не зависит от положения зон гидротермального рудообразования в современных тектонических структурах, на него также не влияет минеральный состав современных построек [Богданов, 2002; Pasava et al., 2004; 2007]. Превышение содержаний золота над платиноидами, также как и для разрабатываемых древних месторождений, составляет величину примерно в два порядка. На основе приведенных данных можно считать, что в рудах колчеданных месторождений не следует ожидать значительных содержаний платиноидов. Из благородных металлов в качестве попутных компонентов основной экономической интерес представляет золото.

Распределение благородных металлов в рудах колчеданных месторождений определяется особенностями их переноса в гидротермальных растворах. Условия переноса и отложения ЭПГ и золота с гидротермальными растворами интерпретируются с привлечением изотермических диаграмм  $pH\text{-}\log f_{O_2}$ , исходя из допущения

равновесия растворов с силикатами, сульфидами и другими минералами рудных тел и зон. В качестве ведущих растворимых форм переноса ЭПГ и золота нами рассматриваются их комплексные соединения с сероводородом (включая продукты его гидролиза) и хлором. На указанных диаграммах поля максимальной растворимости гидросульфидных комплексов платины, палладия и золота попадают в область устойчивости минеральных ассоциаций, представляющих основной объем руд колчеданных месторождений. Положение полей повышенной растворимости платины и палладия в области устойчивости основных ведущих минеральных ассоциаций колчеданных месторождений близко к таковым для золота, из чего следовало бы ожидать накопления платиноидов наряду с золотом. Однако этого не наблюдается. Экспериментальные исследования, выполненные для растворов с различной концентрацией серы и хлора, показывают, что концентрации насыщения растворов платиноидами на несколько порядков уступают таковым для золота [Pan, Wood, 1994]. Выявленная тенденция подтверждена последующими независимыми исследованиями [Горбачев и др., 2007].

За пределами области устойчивости минеральных ассоциаций сульфидных руд, отвечающей повышенным значениям кислотности растворов и активности кислорода, перенос золота и платиноидов может осуществляться в виде хлоридных комплексов. В этом случае различия предельных концентраций насыщения растворов золотом и, с другой стороны, платиной и палладием практически нивелируются, не превышая одного порядка, что благоприятствует появлению золото-платино-палладиевой минерализации. Подтверждением такого механизма одновременного накопления золота и платиноидов является уникальная Au-Pt-Pd минерализация урановых месторождений Аллигейтор Ривер, Северная Австралия, формирование которой связано с эпигенетическими гидротермальными преобразованиями урановых руд. Минеральный состав этих руд представлен хлоритом, гематитом, уранинитом, коффицитом, самородным золотом, платиной и палладием (включая железосодержащие интерметаллиды последних), селенидами свинца и платиноидов, а также стибипалладинитом [Jareth, 1992; Mernagh et al., 1994].

Выбор изотермических диаграмм  $pH$ – $\log f_{O_2}$  для интерпретации условий переноса и накопления благородных металлов в процессах формирования руд колчеданных месторождений основан на опубликованных результатах определения состава гидротермальных растворов в активных гидротермальных постройках. При 250 и 300 °C для парагенетических ассоциаций сульфидов диапазоны изменений для  $pH$  составляют 3–10 и 4–11 соответственно. Активность кислорода  $\log f_{O_2}$  изменяется от –34 до –46 для 250 °C и от –30 до –42 при 300 °C соответственно. Положение парагенетических ассоциаций сульфидов определено на основе значений таких параметров их формирования, как температура  $T$  и летучесть серы  $\log f_{S_2}$ , в отдельных случаях – летучесть кислорода  $\log f_{O_2}$  и теллура  $\log f_{Te_2}$ . Условия экспериментов по растворимости золота, палладия и платины в гидротермальных растворах по таким параметрам, как температура и кислотность, находятся в пределах найденных нами и другими исследователями руд колчеданных месторождений и их современных аналогов. Корректность использования результатов упомянутых экспериментальных работ оправдана и тем, что концентрация растворенной серы 0.01–0.001 моль/л перекрывается с диапазоном прямых определений в растворах подводных гидротермальных построек [Леин и др., 2000; Schmidt et al., 2011]. Таким образом, пониженная растворимость палладия и платины в поле устойчивости сульфидов, равновесных с рудооб-

разующими гидротермальными растворами, не способствует миграции и накоплению данных металлов, даже если колчеданные залежи локализованы в породах основного состава, в которых основное количество платиноидов присутствует в качестве примесей в акцессорных сульфидах.

Выполненные исследования распределения содержаний благородных металлов в колчеданных рудах и анализ опубликованных экспериментальных данных по растворимости комплексных соединений золота, палладия и платины в гидротермальных растворах при физико-химических условиях образования парагенетических минеральных ассоциаций сульфидов позволяют заключить следующее:

- колчеданные месторождения Урала и других регионов, а также продукты современного гидротермального рудообразования, отличаются преобладанием концентрации золота над платиноидами, из которых ведущими элементами являются платина и палладий;

- состав гидротермальных растворов, равновесных с сульфидными минеральными ассоциациями, определял перенос золота и платиноидов в виде их комплексных соединений с сероводородом и продуктами его гидролиза;

- превалирование концентраций золота в растворах связано с повышенной на несколько порядков растворимостью гидросульфидных комплексов золота над аналогичными комплексами палладия и платины.

## Литература

*Богданов Ю. А., Бортников Н. С., Викентьев И. В. и др.* Минералого-геохимические особенности гидротермальных сульфидных руд и флюида поля Рейнбоу, ассоциированного с серпентинитами, Срединно-Атлантический хребет (36°14' с.ш.) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 6. С. 510–542.

*Горбачев Н. С., Дадзе Т. П., Каширцева Г. А.* Экспериментальное изучение поведения золота и палладия во флюидно-магматических и гидротермальных системах // Минералогия Урала-2007. Мат. V Всерос. сов. Миасс–Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 305–308.

*Леин А. Ю., Гричук Д. В., Гурвич Е. Г., Богданов А. Ю.* Новый тип гидротермальных растворов, обогащенных водородом и метаном, в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта // Доклады АН. 2000. Т. 375. № 3. С. 380–383.

*Hayashi K., Ohmoto H.* Solubility of gold in NaCl- and H<sub>2</sub>S-bearing aqueous solutions at 250–350 °C // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. Vol. 55. P. 2111–2126.

*Jaireth S.* The calculated solubility of platinum and gold in oxygen-saturated fluids and the genesis of platinum-palladium and gold mineralization in the unconformity-related uranium deposits // *Mineralium Deposita*. 1992. Vol. 27. P. 42–54.

*Mernagh T. P., Heinrich C. A., Leckie J. F. et al.* Chemistry of low-temperature hydrothermal gold, platinum, and palladium (± uranium) mineralization at Coronation Hill, Northern Territory, Australia // *Economic Geology*. 1994. Vol. 89. P. 1053–1073.

*Pan P., Wood S. A.* Solubility of Pt and Pd sulfides and Au metal in aqueous bisulfide solutions. I. Results at 200–350 °C and saturated vapor pressure // *Mineralium Deposita*. 1994. Vol. 29. P. 373–390.

*Schmidt K., Garbe-Schonberg D., Koschinsky A. et al.* Fluid elemental and stable isotope composition of the Nibelungen hydrothermal field (8°18' S, Mid-Atlantic Ridge): Constraints on fluid–rock interaction in heterogeneous lithosphere // *Chemical Geology*. 2011. Vol. 280. P. 1–18.

*Vikentyev I.V., Yudovskaya M.A., Mokhov A.V. et al.* Gold and PGE in massive sulfide ore of the Uzelginsk deposit, Southern Urals, Russia // *Canadian Mineralogist*. 2004. Vol. 42. P. 651–665.