

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ Au НА ЭПИТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЙРАГАЧ (УЗБЕКИСТАН)

Плотинская О.Ю., Прокофьев В.Ю., Коваленкер В.А. (ИГЕМ РАН)

тел.: (095) 230-82-71, 230-82-34, e-mail: [plotin@igem.ru](mailto:plotin@igem.ru), [vak@igem.ru](mailto:vak@igem.ru), [vp@igem.ru](mailto:vp@igem.ru)

Месторождение Кайрагач принадлежит к редкому на территории бывш. СССР высокосульфидизированному (кислотно-сульфатному) типу эпитеpмального оруденения. Оно расположено в Приангренском районе на северном склоне Кураминского хребта, в пределах кальдеры, выполненной вулканогенно-осадочными и субвулканическими андезитами и андезитодацитами средне- и позднекаменноугольного возраста [1]. Золото-сульфидно-теллуридно-селенидное оруденение приурочено к субвертикальным и пологим зонам окварцевания, к кварцевым и кварц-баритовым жилам и зонам брекчирования. На месторождении выделяются 4 стадии формирования руд: I- предрудных метасоматитов (березитов), II- золото-кварц-пиритовая (ранняя рудная), III- золото-блеклорудно-сульфосольно-теллуридная (основная рудная) IV- галенит-сфалеритовая (пострудная). Термобарогеохимические и изотопные данные свидетельствуют о том, что минеральные ассоциации основной рудной стадии были сформированы слабокислыми флюидами смешанного метеорно-магматического происхождения при температурах от 330 до 200<sup>0</sup>С. Флюиды характеризовались широкими вариациями солености (от 21.5 до 0.5, чаще 7,0-0,5 мас. % экв. NaCl) и различными соотношениями SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S на верхних и нижних горизонтах [2].

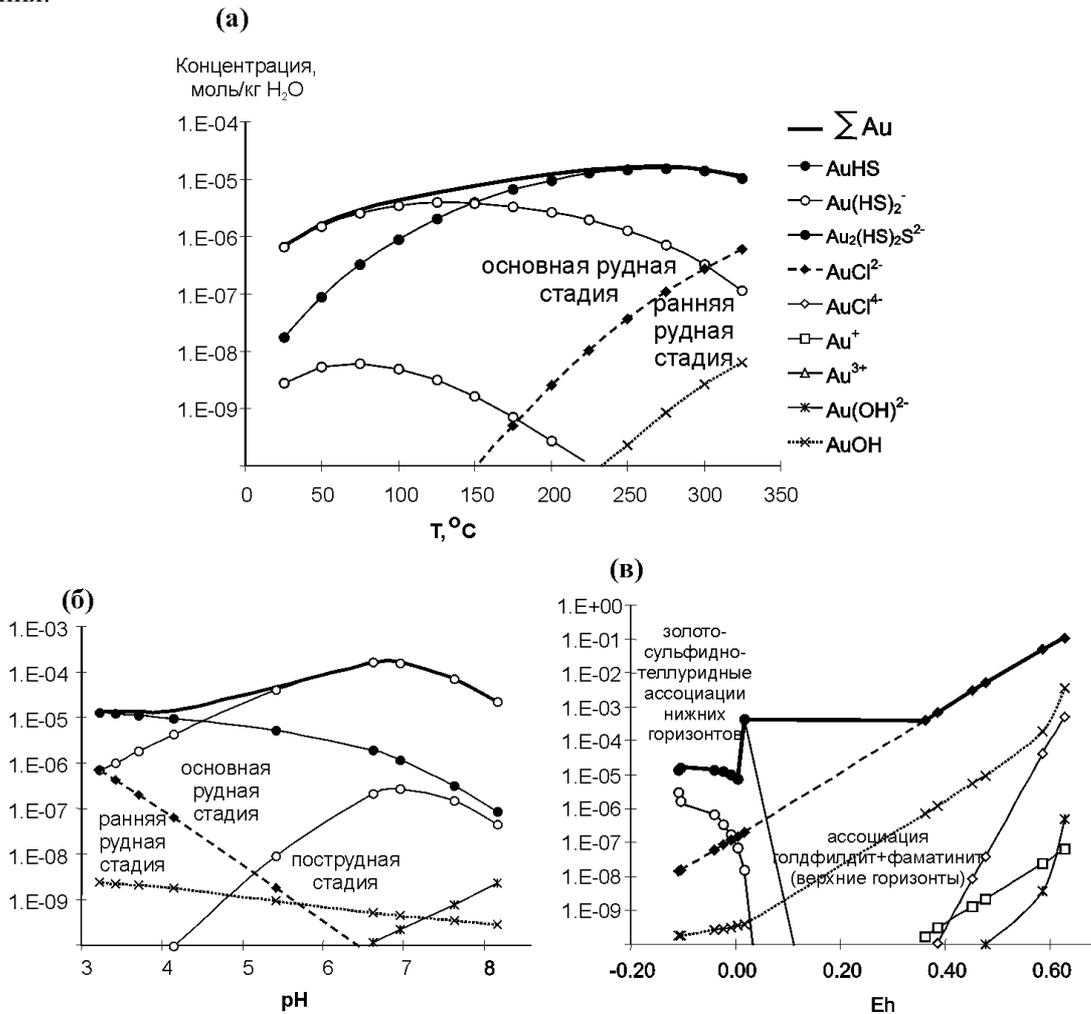
Для выяснения возможных форм нахождения и оценки концентраций золота в растворе в зависимости от вариаций физико-химических параметров было проведено термодинамическое моделирование равновесной растворимости золота в системе Au-NaCl-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O при помощи программного комплекса "GIBBS" версии 3.6 с банком термодинамических данных UNITERM версии 3.6 [3]. Интервалы температур и давлений, а также исходный состав системы (1 кг H<sub>2</sub>O, 1M NaCl, 0.06 M CO<sub>2</sub>, 0.08 M H<sub>2</sub>S, 0.02 M SO<sub>2</sub> и 1 M Au) для оценки равновесной растворимости золота (взятого в избытке) были выбраны с учетом результатов изучения флюидных включений и стабильных изотопов. Установлено, что формы нахождения Au и его растворимость испытывают сильную зависимость от изменения температуры, а также от pH и Eh модельного раствора.

Зависимость растворимости Au от температуры рассчитывалась в интервале 325-25<sup>0</sup>С. Согласно расчетам, золото в модельном растворе должно присутствовать, главным образом, в виде комплексов AuHS и Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup> при ничтожной роли прочих форм (Au<sup>+</sup>, Au<sup>3+</sup>, AuOH, Au(OH)<sub>2</sub><sup>-</sup>, Au<sub>2</sub>(HS)<sub>2</sub>S<sup>2-</sup>, AuCl<sub>2</sub><sup>-</sup>, AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup>). При этом в интервале температур 350<sup>0</sup>С - 175<sup>0</sup>С в растворе доминирует комплекс AuHS<sup>0</sup>, составляя до 90% всего растворенного в данном растворе золота, тогда как при более низких температурах (< 150<sup>0</sup>С) в растворе преобладает комплекс Au(HS)<sub>2</sub>. (рис.1, а) По мере снижения температуры, начиная примерно с 250<sup>0</sup>С, общая растворимость Au резко падает, вызывая тем самым его осаждение из раствора.

Зависимость растворимости Au от изменения кислотности-щелочности раствора рассчитывалась в интервале pH от 3 до 8 при T=250<sup>0</sup>С (рис.1 б). Установлено, что при pH = 3-4 в растворе должен преобладать комплекс AuHS, содержание Au составляет около 1x10<sup>-5</sup> моль/кг H<sub>2</sub>O и остается постоянным. При повышении щелочности до pH=6.5 (например, вследствие отделения кислых газов при кипении флюида) растворимость Au возрастает более, чем на порядок и его содержание увеличивается до 1.6x10<sup>-4</sup> моль/кг H<sub>2</sub>O. Дальнейшее увеличение щелочности раствора (до pH=8) приводит к падению растворимости Au до исходного значения. При этом, в растворах с pH>4.5 основной формой нахождения золота является комплекс Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>. Поскольку минерализация ранней рудной стадии, а также ранние ассоциации основной рудной стадии формировались в кислой среде (pH=2-4), а поздние ассоциации этой стадии - в слабокислой-слабощелочной среде, увеличение растворимости золота при увеличении pH в модельном растворе объясняет тот факт, что золотом обогащены, главным образом, ранние минеральные ассоциации основной рудной стадии.

Влияние окислительного потенциала (Eh) на растворимость Au оценивалось для интервала значений H<sub>2</sub>S/SO<sub>2</sub> от 0.1 до 10.0 при T=250<sup>0</sup>С. Результаты расчетов (рис.1,в) показывают, что

при изменении Eh от 0.60 до -0.01 концентрация Au в растворе падает на четыре порядка - от  $10^{-1}$  до  $10^{-5}$ . Дальнейшее уменьшение Eh модельного раствора, вплоть до -1.20, не приводит к реальному изменению растворимости. При этом, в растворе с Eh до 0.005 преобладают хлоридные ( $\text{AuCl}_2^-$  и  $\text{AuCl}_4^-$ ) и гидроксидные ( $\text{AuOH}$ ) формы, в других случаях доминирует комплекс  $\text{AuHS}$ . В соответствие с результатами изучения минералого-геохимической зональности и изотопными данными в направлении от глубоких к приповерхностным уровням месторождения Кайрагач обстановка минералообразования изменялась от относительно восстановительной ( $\text{H}_2\text{S} > \text{SO}_2$ ,  $\text{Eh} < 0$ ) до высокоокислительной ( $\text{H}_2\text{S} < \text{SO}_2$ ,  $\text{Eh} > 0$ ). Рост растворимости Au в модельном растворе при повышении Eh объясняет факт уменьшения содержаний золота в рудах, образованных в более окислительных условиях, то есть в направлении к верхним частям месторождения.



**Рис.1.** Зависимость растворимости различных комплексов Au от физико-химических условий

Представленные результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что самородное золото ранней рудной стадии осаждалось из раствора, в основном, при распаде комплекса  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  и, частично, комплекса  $\text{AuCl}_2^-$  в относительно высокотемпературных условиях (300-250 $^\circ\text{C}$ ). Основное количество самородного золота осадилось из раствора при распаде комплекса  $\text{AuHS}^0$  в кислой среде в температурном интервале 250-125 $^\circ\text{C}$ , который соответствует температуре формирования минеральных ассоциаций основной рудной стадии. Полученные данные показывают, что одним из основных факторов осаждения золота при формировании золотоносных ассоциаций руд явилось снижение температуры минералообразующего раствора, вызванное его остыванием по мере удаления от источника тепла, его вскипанием в результате падения давления, и смешением с метеорными водами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (по проектам № 01-05-64081, 03-05-06063 МАС, 01-05-64675)*

## Литература

1. Коваленкер В.А. и др. Геол. Рудн. Мест. Т. 45. № 3. 2003. С. 195-227.
2. Плотинская О.Ю. и др. Труды X Междунар. конф. по термобарогеохимии. 2001. С. 158-179.
3. Shvarov. Y. V. Abstr. of the 2nd Int. Symp. "Thermodynamics of Natural Processes". 1992. P.51.

---

*Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(21) 2003*

*Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2003 года (ЕСЭМПГ-2003)*

*URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dggms/1-2003/informbul-1/hydroterm-11.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2003/informbul-1/hydroterm-11.pdf)*

*Опубликовано 15 июля 2003 г.*

*© Отделение наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2003*

*При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна*