

**Образование и миграционное поведение тиосульфата золота (I) в водных системах золоторудных месторождений (экспериментальное исследование)**

И. В. Кубракова, Д. В. Пряжников, И. Я. Кошечева, О. А.Тютюнник, Н. В. Корсакова,  
 Д. Н. Чхетия, Л. В. Кригман  
 Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В. И.Вернадского, Москва  
 kubrakova@geokhi.ru

*Ключевые слова:* золото, выщелачивание из пород, тиосульфатный комплекс Au(I), сорбция на гетите и гуминовых кислотах.

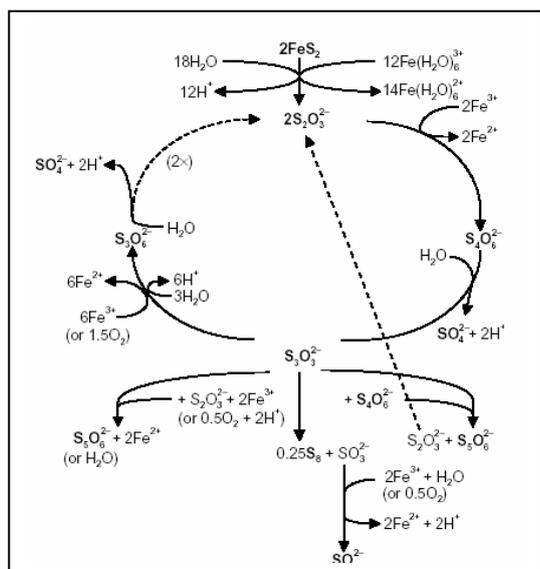
**Ссылка:** Кубракова, И.В., Д. В. Пряжников, И. Я. Кошечева, О. А.Тютюнник, Н. В. Корсакова, Д. Н. Чхетия, Л. В. Кригман Л.В. (2011), Образование и миграционное поведение тиосульфата золота (I) в водных системах золоторудных месторождений (экспериментальное исследование), *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6059, doi:10.2205/2011NZ000189.

В процессе разработки малосульфидных и сульфидных руд благороднометалльных месторождений происходит дренирование вскрышных и отвальных пород атмосферными осадками. В результате контакта пород с водой и кислородом воздуха при последовательном окислении сульфидных минералов образуется целый ряд соединений серы в различных степенях окисления (рис. 1). Взаимодействие некоторых из этих лигандов с ионами металлов приводит к образованию прочных комплексных соединений, обуславливающих миграционное поведение элементов. В частности, известно, что нейтральные и щелочные среды весьма благоприятны для образования и существования прочных тиосульфатных комплексов Au(I) ( $\lg K_{\text{уст}} = 26.5-28.0$ ) [Schippers, Rohwerder, 1999].

В настоящей работе на примере пород (состав см. табл.1), содержащих пирротин и пирит с включениями благородных металлов, в динамическом эксперименте исследована кинетика образования тиосульфат-иона и тиосульфатного комплекса Au(I). Поведение тиосульфатной формы золота исследовано в модельных сорбционных экспериментах на основных компонентах природных геохимических барьеров (гетите, гуминовых кислотах (ГК) и гетите в присутствии фульвокислот (ФК)) и сопоставлено с поведением гидроксохлоридных форм золота в этих системах.

**Таблица 1.** Состав породы, использованной в эксперименте

Элемент	Содержание
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	16,74
CaO, %	6,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	12,74
K <sub>2</sub> O, %	0,08
MgO, %	8,68
MnO, %	0,13
Na <sub>2</sub> O, %	1,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	<0.01
SiO <sub>2</sub> , %	52,66
TiO <sub>2</sub> , %	0,33
Ni, %	0,47
S, %	0,054
Co, ppm	89
Cr, %	0,10
Cu, %	0,25
Au, ppb	75



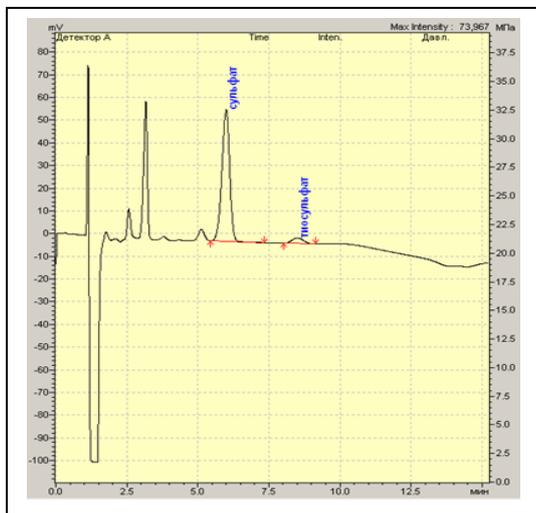
**Рис. 1.** Схема окисления пирита [Schippers, Rohwerder, 1999].

В предварительных статических экспериментах с использованием образцов крупностью 200 меш тиосульфат-ион был обнаружен в растворе методом ионной хроматографии (рис.2) с первых

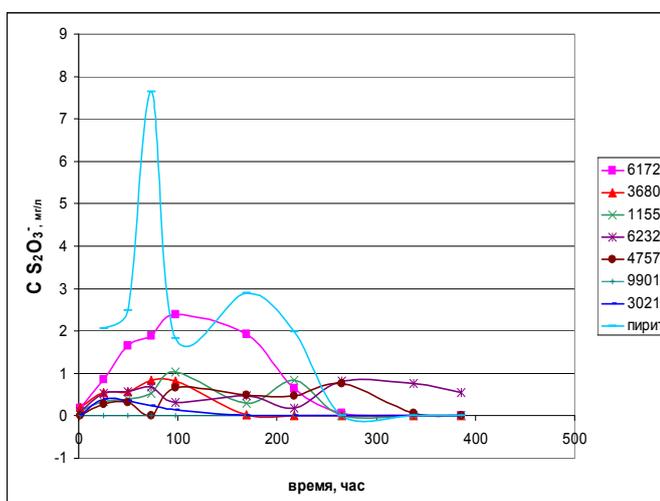
## КУБРАКОВА И ДР.: ВОДНЫЕ СИСТЕМЫ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

часов взаимодействия компонентов системы (рис.3). Показана также возможность регистрации образующегося комплекса золота с тиосульфатом, основанная на сочетании методов ЭТААС и ВЭЖХ (рис.4).

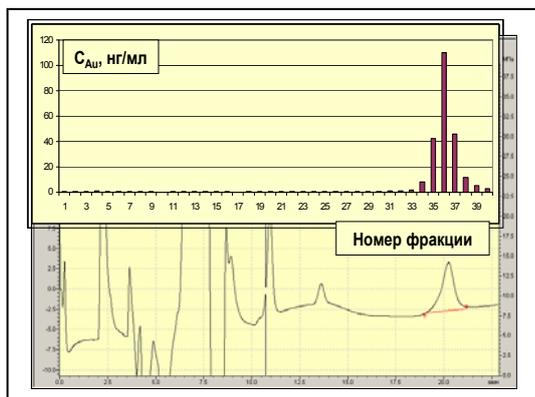
Кинетика выщелачивания исследована в динамическом эксперименте, осуществленного с использованием специальной ячейки с чередующейся подачей воды (2 ч) и воздуха (22 ч), в которую помещали 300 г породы с крупностью частиц <5 мм. На восьмые сутки эксперимента на фоне



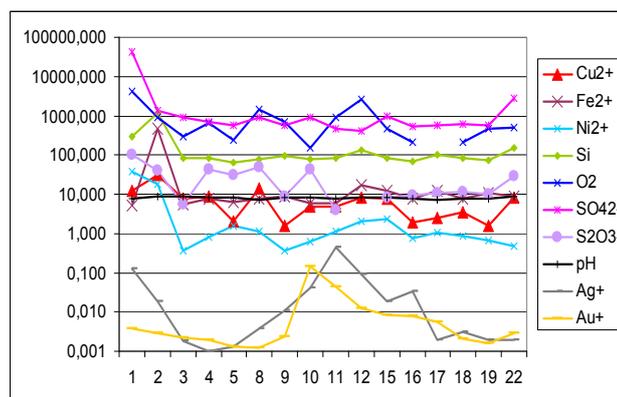
**Рис. 2.** Вид хроматограммы при определении сульфат- и тиосульфат-ионов



**Рис.3.** Зависимость концентрации тиосульфат-иона от времени в системах «вода-порода» в статических условиях



**Рис. 4.** Пик тиосульфата золота на хроматограмме (внизу); содержание золота в хроматографических фракциях измерено методом ЭТААС (вверху)



**Рис. 5.** Изменение содержания компонентов раствора во времени

высоких содержаний тиосульфат-аниона зафиксировано появление в растворе золота (рис.5). Тем самым подтверждено образование тиосульфатных комплексов золота при контакте золотосодержащих сульфидных пород с атмосферными осадками и кислородом воздуха.

Сорбция тиосульфатного комплекса золота на гетите, ГК, а также гетите в присутствии ФК исследована в сорбционных экспериментах с использованием предварительно синтезированных препаратов. Для экспериментов гетит получали из азотнокислой соли Fe(III); малозольные препараты ГК выделяли из торфа Тверской области; ФК для модифицирования гетита выделяли из высокоцветной воды истока р.Москвы. Эксперимент выполняли по единому алгоритму. 20 мг ГК, 50 мг гетита либо 50 мг модифицированного гетита приводили в контакт с растворами тиосульфата золота (I) с концентрациями  $n \cdot 10^{-5} \text{M}$  по золоту, выдержанными предварительно в колбах до установления постоянных значений рН (от 5.0 до 9.0). Через 1, 3, 7, 14, 21 сут в трех сериях экспериментов измеряли концентрации золота для каждого значения рН и строили графики

зависимости сорбции золота (I) от времени (рис. 6). Значения сорбции в равновесных состояниях системы использовали для выявления зависимости сорбции тиосульфата золота (I) от pH растворов.

Установлено высокое сродство тиосульфата Au(I) к гетиту при pH 5.0 и 6.0: извлечение золота составляет 97% и 87% соответственно. С увеличением pH до 9.0 сорбция снижается до 55%. На ГК

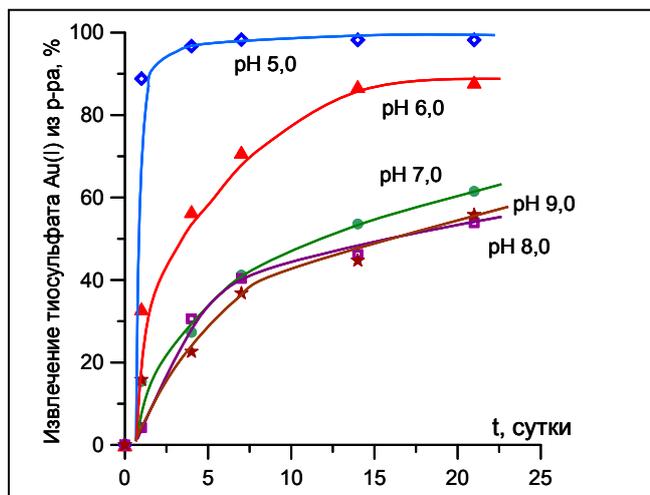


Рис.6. Зависимость сорбции тиосульфатных комплексов Au(I) на гетите от времени для различных значений pH

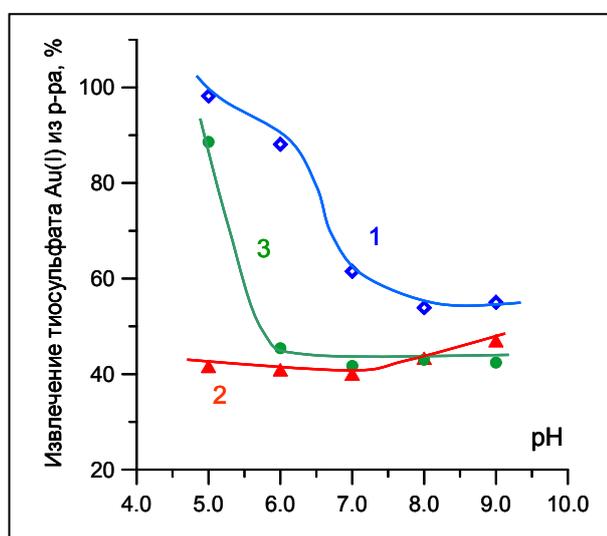


Рис.7. Сорбция тиосульфатных комплексов Au(I) на гетите (1); гуминовых кислотах (2); на гетите в присутствии фульвокислот (3)

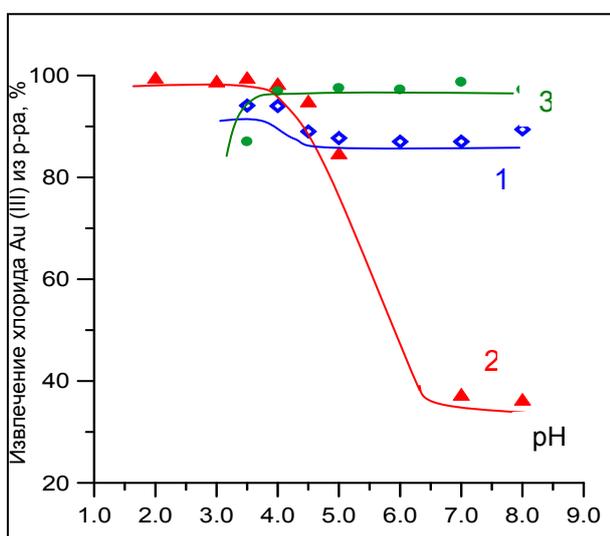


Рис.8. Сорбция хлоридных комплексов Au(III) на гетите (1); гуминовых кислотах (2); на гетите в присутствии фульвокислот (3)

величина сорбции еще ниже (около 40%) почти во всем исследованном диапазоне pH, что резко отличает поведение тиосульфатных комплексов Au(I) от хлоридных комплексов Au(III) на этих же сорбентах (рис.7, 8).

Таким образом, при исследовании взаимодействия «вода-порода» установлено, что даже при содержании сульфидов в породе менее 1% концентрация тиосульфат-иона в дренажных растворах может достигать 0.35 мг/л. При этом образующиеся растворы содержат до 1 мкг/л растворенного золота (при его содержании в породе ~75 ppb).

В слабкокислых средах (pH 5–6) растворенные тиосульфатные комплексы Au(I) полностью сорбируются оксигидроксидами железа и частично органическими осадками. В нейтральных и слабощелочных средах, в отличие от хлоридных комплексов (рис.8), не менее половины растворенных тиосульфатных форм золота способно мигрировать с природными водами.

### Литература

Aylmore, M.G., D. M. Muir (2001), Thiosulfate Leaching of Gold (a Review), *Minerals Engineering*, v. 14, № 2, pp. 135-174, doi : 10.1016/S0892-6875(00)00172-2.

## КУБРАКОВА И ДР.: ВОДНЫЕ СИСТЕМЫ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Schippers, T., W. Rohwerder (1999), Sand Intermediary sulfur compounds in pyrite oxidation: implications for bioleaching and biodepyritization of coal, *Appl Microbiol Biotechnol.* v. 52, № 1, pp. 104-110, doi: 10.1007/s002530051495.