

## ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ РАЗНОЛИГАНДНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА КИНЕТИКУ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

В.И. Луцик, Ю.В. Чурсанов, А.В. Старовойтов

Владимир Иванович Луцик\*, Юрий Валентинович Чурсанов, Анатолий Владимирович Старовойтов  
Кафедра химии, Тверской государственный технический университет, наб. Афанасия Никитина, 22,  
Тверь, Российская Федерация, 170026  
E-mail: vlutsik@list.ru\*, Yury.Chursanov@yandex.ru, AVStarovoytov7@yandex.ru

*Методом вращающегося диска изучено растворение золота в присутствии окислителя и смеси разнородных лигандообразующих реагентов. Исследованы кинетические закономерности растворения золота в водных системах тиомочевина–тиоцианат с ионами Fe(III) и Cu(II) в качестве окислителя: тиомочевина–тиосульфат окислитель – комплекс Fe(III)EDTA и тиосульфат–тиоцианат окислитель – аммиачный комплекс  $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ . Особенностью данных смешанных систем является возможность образования как монолигандных, так и гетеролигандных комплексов золота. Рассмотрено влияние образования разнолигандных комплексов золота на скорость растворения металла. Исследована зависимость скорости от соотношения концентраций лигандов и природы окислителя. Установлена взаимосвязь: использование разнородных лигандообразующих реагентов – более высокая термодинамическая устойчивость образующихся гетеролигандных комплексов золота (относительно гомолигандных) – синергетическое увеличение скорости растворения золота. Установлено, что для системы тиомочевина–тиоцианат–Fe(III) макромеханизм гетерофазной реакции определяется близостью скоростей химической и диффузионных стадий (экспериментальная энергия активации – 21,6 кДж/моль; порядок реакции по частоте вращения диска – 0,23). Диффузионное лимитирование обусловлено медленным отводом продуктов реакции – соединений Au(I) от поверхности твердой фазы. Образование более прочных гетеролигандных комплексов и соответствующий рост концентрации продуктов реакции у поверхности приводит к увеличению скорости диффузии металла в раствор. Для системы тиомочевина–тиосульфат–Fe(III)EDTA отмечено образование пленки твердых продуктов реакции на поверхности золота. Для ее идентификации получены ИК-спектры отражения полированной поверхности золота после травления в изученной системе. На спектрах наблюдается сильная полоса поглощения при  $804\text{ см}^{-1}$ . Поглощение в этой области связано с валентными симметричными колебаниями связи группы  $-C=S$  адсорбированных или химически связанных с поверхностью молекул тиомочевины и продуктов ее окисления.*

**Ключевые слова:** золото, тиомочевина, тиоцианат, тиосульфат, кинетика растворения, вращающийся диск, разнолигандные комплексы

## INFLUENCE OF FORMATION OF THE COMPLEXES WITH DIFFERENT KIND OF LIGANDS ON KINETICS OF OXIDATIVE DISSOLUTION OF METALS

V.I. Lutsik, Yu.V. Chursanov, A.V. Starovoytov

Vladimir I. Lutsik\*, Yury V. Chursanov, Anatoly V. Starovoytov  
Department of Chemistry, Tver State Technical University, Afanasiy Nikitin emb., 17, Tver, 170026, Russia  
E-mail: vlutsik@list.ru\*, Yury.Chursanov@yandex.ru, AVStarovoytov7@yandex.ru

*Rotating disk method has been used to study the dissolution of gold in the presence of an oxidizer and a mixture of dissimilar ligandforming reagents. Kinetic regularities of gold dissolution were investigated in aqueous systems thiourea-thiocyanate with Fe (III) and Cu (II) ions as*

*the oxidizer; thiosulfate-thiocyanate with Fe(III)EDTA oxidizing complex and thiosulfate-thiocyanate with ammonia complex  $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$  as oxidizing agent. Peculiarities of these mixed systems is a possibility to form the monoligand as well as heteroligand complexes of gold. The influence of gold complexes formation with different sorts of ligands on the metal dissolution rate have been considered. The dependence of the dissolution rate on the ratio of ligands concentrations and on the oxidizing agent nature was investigated. Interrelation was established: the use of dissimilar ligand-forming reagents - the higher thermodynamic stability of the heteroligand complexes of gold (relative to the homoligand ones) - synergistic increase of the gold dissolution rate. It was found that the heterophase reaction mechanism for the thiourea-thiocyanate-Fe(III) system is determined by the proximity of the rates of chemical and diffusion stages (experimental activation energy - 21.6 kJ/mol; the reaction order in respect to the disk rotation frequency - 0.23). Diffusive limitation is due to the slow withdrawal of the reaction products - Au (I) compounds - from the solid phase surface. The formation of stronger heteroligand complexes and the corresponding increase in the reaction products concentration at the surface increases a rate of the metal diffusion into the solution. For the thiourea-thiosulfate-Fe(III)EDTA system a film formation of the reaction solid products on the gold surface was observed. To identify it the infrared reflection spectra of the polished gold surface after the etching were obtained. There is a strong absorption band on the spectra at  $804\text{ cm}^{-1}$ . Absorption in this area has been associated with the stretching vibrations of C=S bond of the thiourea molecules joined to the surface and the products of their oxidation.*

**Keywords:** gold, heteroligand gold complexes, thiourea, thiocyanate, thiosulfate, synergistic effect, rotating disc, dissolution kinetics

**Для цитирования:**

Луцик В.И., Чурсанов Ю.В., Старовойтов А.В. Влияние образования разнолигандных комплексов на кинетику окислительного растворения металлов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 8. С. 22–26

**For citation:**

Lutsik V.I., Chursanov Yu.V., Starovoytov A.V. Influence of formation of the complexes with different kind of ligands on kinetics of oxidative dissolution of metals. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 8. P. 22–26

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основная масса гидрометаллургического золота добывается методом цианирования. Недостатки цианистого процесса известны: низкая эффективность для углерод- и медьсодержащих руд; невысокая скорость реакции, вызванная ограниченной растворимостью окислителя – кислорода; экологические проблемы, связанные с высокой токсичностью цианидов. В связи с этим продолжают разрабатывать альтернативных гидрометаллургических реагентов. Из известных потенциальных растворителей золота [1-9] наиболее перспективны тиомочевина, тиосульфат и тиоцианат, которые пока не способны конкурировать по экономичности с цианированием. Одним из путей интенсификации процессов может быть проведение окисления металлов в присутствии реагентов, способных образовывать разнолигандные комплексы. При этом происходит синергетическое увеличение скорости растворения [10-12] за счет большей термодинамической устойчивости образующихся соединений [13]. Настоящая работа посвящена изучению кинетики

окислительного растворения золота при образовании смешаннолигандных комплексов.

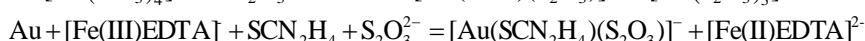
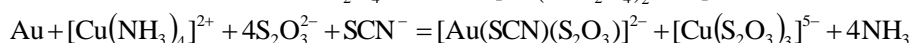
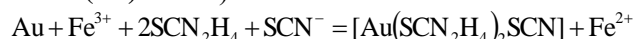
## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Растворение золота осуществляли методом вращающегося диска [14] в условиях контролируемой конвективной диффузии. Образец золота (чистота – 99,9%) в виде диска диаметром 25 мм, клеенный во фторопластовую оправку, полировали и промывали до полного смачивания поверхности [15]. Растворение проводили в термостатированном реакторе объемом 200 мл. В ходе опыта через заданные интервалы времени отбирали пробы раствора и определяли в них концентрацию золота фотометрически с тиокетоном Михлера [16]. Удельную скорость растворения рассчитывали по количеству золота, перешедшего в раствор за единицу времени с единицы площади поверхности диска.

Для идентификации твердых промежуточных продуктов реакции записывали ИК-спектры зеркального отражения с поверхности золота на Фурье-спектрометре ФСМ 2201 ООО «Инфраспек» в области волновых чисел  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  со спектральным разрешением  $4\text{ cm}^{-1}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучена кинетика растворения золота в системах, способных образовывать разнолигандные комплексы золота: тиомочевина – тиоцианат калия, окислитель – соли железа(III) (**Tu-Tcy-Fe(III)**); тиомочевина – тиоцианат калия, окислитель – соли меди(II) (**Tu-Tcy-Cu(II)**); тиосульфат натрия – тиоцианат калия, окислитель – аммиачный комплекс меди(II) (**Ts-Tcy-[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>**) и тиомочевина – тиосульфат натрия, окислитель – комплекс ЭДТА с Fe<sup>3+</sup> (**Tu-Ts-Fe(III)EDTA**). Вли-



Комплексные соединения тиоцианата и тиомочевина, которые могут образовываться с ионами Fe(III) и Cu(II), на окислительные свойства ионов существенного влияния не оказывают и в реакционных схемах не учтены.

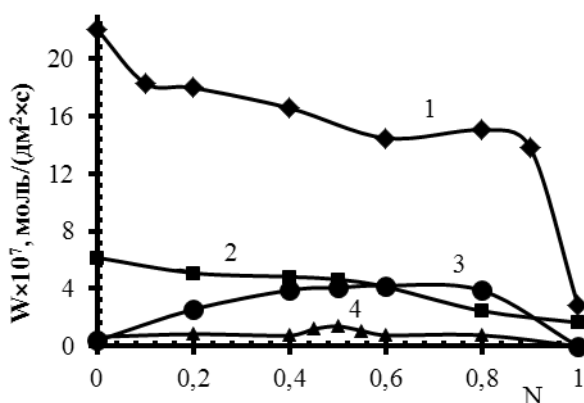


Рис. 1. Скорость растворения золота в изомолярной смеси лигандов 1 – Tu-Tcy-Fe(III); 2 – Tu-Tcy-Cu(II); 3 – Tu-Ts-Fe(III)EDTA; 4 – Ts-Tcy-[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>; N – мольная доля второго реагента

Fig. 1. The effect of the reactants molar fraction on the rate of gold dissolution 1 – Tu-Tcy-Fe(III); 2 – Tu-Tcy-Cu(II); 3 – Tu-Ts-Fe(III)EDTA; 4 – Ts-Tcy-[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>; N – mole fraction of the second reagent

Процесс перехода золота в раствор в изученных системах может быть представлен как сумма трех параллельных реакций: образования индивидуальных комплексов и комплексов с разнородными лигандами. На основе полученных данных предложена математическая модель процесса окислительного растворения золота, описываемая уравнением:

$$W = k_1 \cdot [L_1]^n + k_2 \cdot [L_2]^m + k_3 \cdot [L_1]^n \cdot [L_2]^m,$$

где [L] – концентрация соответствующего лиганда,  $k_1$ ,  $k_2$  – константы скорости реакции с индивидуальным лигандом,  $k_3$  – с разнородными лиган-

дами;  $n$  и  $m$  – экспериментальные порядки скоростей по концентрации. При этом получали зависимости скорости растворения от мольной доли одного из реагентов при постоянной сумме концентрации реагентов, которая равна 0,5 М (рис. 1). Условия проведения эксперимента для всех кривых: концентрация окислителя 0,01 М; частота вращения диска 10 с<sup>-1</sup>; температура 25 °С.

Образование смешаннолигандных комплексов при окислении золота представлено на соответствующих схемах:

Данная модель описывает кинетику растворения золота в изомолярной серии при постоянной концентрации окислителя 0,01 М, температуре 298 К и частоте вращения диска 10 с<sup>-1</sup>. В таблице приведены оценки величин констант и порядков реакции по концентрации. Для решения обратной задачи химической кинетики использовали метод нелинейной регрессии, входящий в пакет SigmaPlot 2000 ver 6.0 SPSS Inc. Программа основана на итерационном алгоритме Marquardt-Levenberg, в котором происходит минимизация суммы квадратов невязок между расчетными и экспериментальными значениями. Величины констант свидетельствуют о существенном росте скорости реакции за счет образования гетеролигандных комплексов ( $k_3$ ), что подтверждает их роль в процессе окисления золота. Данные о константах образования гетеролигандных комплексов золота в изученных системах отсутствуют. Однако, для смесей тиосульфат – сульфит известны константы реакции образования смешанного тиосульфат-сульфитного комплекса золота:

$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + r\text{SO}_3^{2-} = [\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_r]^{-(2r+1)} + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  
которые составляют  $\log K = 1,1$  для  $r = 1$  и  $\log K = 4,8$  для  $r = 2$  [17]. В работе [18] проведен расчет возможных структур комплексных ионов золота смешанного состава, в которых присутствуют цианид-, роданид и тиосульфат-ионы в различных сочетаниях. Согласно расчетам, цианидные комплексы золота с участием тиоцианат- и тиосульфат-ионов имеют сравнимую, а в ряде случаев и более высокую устойчивость, чем чисто цианидные комплексы. По утверждению авторов [19], эффект стабилизации при образовании гетеролигандных комплексов характерен для многих систем.

**Таблица**  
**Кинетические характеристики процессов растворения в изомольных сериях**  
**Table. Kinetic characteristics of dissolution processes in isomolar series**

Система	$k_1$	$k_2$	$k_3$	n	m
Tu-Tcy-Cu(II)	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$6,83 \cdot 10^{-7}$	$6,46 \cdot 10^{-5}$	2,06	1,92
Ts-Tcy- [Cu(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ] <sup>2+</sup>	$2,62 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-11}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	0,87	1,34
Tu-Tcy-Fe(III)	$3,35 \cdot 10^{-6}$	$6,37 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$	0,64	4,49
Tu-Ts- Fe(III)EDTA	$5,33 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,29 \cdot 10^{-6}$	0,47	0,82

Для системы Tu-Tcy-Fe(III) установлено, что макро механизм гетерофазной реакции определяется близостью скоростей химической и диффузионных стадий (экспериментальная энергия активации – 21,6 кДж/моль; порядок реакции по частоте вращения диска – 0,23) [20]. Причем медленным процессом является отвод продуктов реакции от поверхности раздела фаз. При этом скорость реакции и порядки скорости по реагентам зависят от формирующейся на границе раздела фаз концентрации комплексов. Поскольку эта концентрация определяется и кинетическими, и термодинамическими факторами, порядки реакций могут принимать значения, не характерные для формальной кинетики.

На рис. 2 приведены спектры отражения, зарегистрированные после обработки поверхности золота в соответствующей системе. Характерной особенностью является наличие полос при волновых числах 804 см<sup>-1</sup> (Tu – Ts – Fe(III)EDTA), 840 см<sup>-1</sup> для Tu – Fe(III). Эти полосы могут быть связаны с образованием соединений адсорбционного типа с Au-(S-C)<sub>адс</sub> и соответствуют валентным колебаниям связи S-C. Различие частот объясняется влиянием второго лиганда.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Hilson G., Monhemius A.J.** Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future. *J. Cleaner Production*. 2006. N 14. P. 1158-1167. DOI: 10.1016/j.clepro.2004.09.005.
- Li J., Miller J.D.** Reaction kinetics of gold dissolution in acid thiourea solution using ferric sulfate as oxidant. *Hydrometallurgy*. 2007. V. 89. P. 279-288. DOI: 10.1016/j.hydromet.2007.07.015.
- Li J., Miller J.D.** Reaction kinetics for gold dissolution in acid thiourea solution using formamidine disulfide as oxidant. *Hydrometallurgy*. 2002. V. 63. P. 215-223. DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00212-2.
- Li J., Safarzadeh M.S., Moats M.S., Miller J.D. LeVier K.M., Dietrich M., Wan R.Y.** Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part II: The leaching kinetics. *Hydrometallurgy*. 2012. V. 113-114. P. 10-18. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.11.007.
- Muir D.M., Aylmore M.G.** Thiosulphate as an alternative to cyanide for gold processing – issues and impediments. *Mineral Proc. Extract. Metallurgy*. 2004. V. 113. P. 2-12. DOI: 10.1179/037195504225004661.

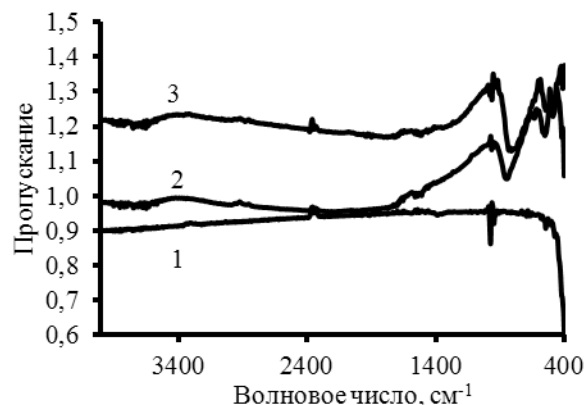


Рис. 2. ИК спектры зеркального отражения поверхности золота после растворения 1 – исходный образец; 2 – после растворения в системе Tu – Fe(III); 3 – после растворения в системе Tu – Ts – Fe(III)EDTA

Fig. 2. Specular reflection IR spectra of the gold surface after dissolution 1 – initial sample; 2 – after dissolution in the system Tu – Fe(III); 3 – after dissolution in the system Tu – Ts – Fe(III)EDTA

#### ВЫВОДЫ

Образование гетеролигандных комплексов оказывает существенное влияние на кинетику окислительного растворения золота. Обнаружено синергетическое увеличение скорости процесса за счет повышенной устойчивости образующихся соединений. Определены некоторые кинетические характеристики процессов, показано, что растворение протекает через образование поверхностных адсорбционных соединений золота. Применение реагентов, образующих разнолигандные комплексы, позволяет разработать новые альтернативные гидрометаллургические растворители золота.

#### REFERENCES

- Hilson G., Monhemius A.J.** Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future. *J. Cleaner Production*. 2006. N 14. P. 1158-1167. DOI: 10.1016/j.clepro.2004.09.005.
- Li J., Miller J.D.** Reaction kinetics of gold dissolution in acid thiourea solution using ferric sulfate as oxidant. *Hydrometallurgy*. 2007. V. 89. P. 279-288. DOI: 10.1016/j.hydromet.2007.07.015.
- Li J., Miller J.D.** Reaction kinetics for gold dissolution in acid thiourea solution using formamidine disulfide as oxidant. *Hydrometallurgy*. 2002. V. 63. P. 215-223. DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00212-2.
- Li J., Safarzadeh M.S., Moats M.S., Miller J.D. LeVier K.M., Dietrich M., Wan R.Y.** Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part II: The leaching kinetics. *Hydrometallurgy*. 2012. V. 113-114. P. 10-18. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.11.007.
- Muir D.M., Aylmore M.G.** Thiosulphate as an alternative to cyanide for gold processing – issues and impediments. *Mineral Proc. Extract. Metallurgy*. 2004. V. 113. P. 2-12. DOI: 10.1179/037195504225004661.

6. **Senanayake G.** Analysis of reaction kinetics, speciation and mechanism of gold leaching and thiosulfate oxidation by ammoniacal copper(II) solutions. *Hydrometallurgy*. 2004. V. 75. P. 55-75. DOI: 10.1016/j.hydromet.2004.06.004.
7. **Senanayake G.** The role of ligands and oxidants in thiosulfate leaching of gold. *Gold Bulletin*. 2005. V. 38. N 4. P. 170-179. DOI: 10.1007/BF03215257.
8. **Senanayake G.** Gold leaching by thiosulphate solutions: a critical review on copper(II)–thiosulphate–oxygen interactions. *Mineral. Eng.* 2005. V. 18. P. 995-1009. DOI: 10.1016/j.mineng.2005.01.006.
9. **Senanayake G., Zhang X.M.** Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part II: Effect of residual Cu(II), pH and redox potentials on reactivity of colloidal gold. *Hydrometallurgy*. 2012. V. 115-116. P. 21-29. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.11.010.
10. **Chursanov Yu.V., Potashnikov Yu.M., Gortsevich S.L.** The kinetics of silver oxidation with oxygen in solutions containing thiocyanate-thiourea and thiocyanate-thiosulfate mixtures. *Russ. J. Phys. Chem.* 2007. V. 81. N 2. P. 176-178. DOI: 10.1134/S0036024407020057.
11. **Поташников Ю.М., Чурсанов Ю.В., Горцевич С.Л.** Кинетика растворения сульфида серебра в присутствии разнородных лигандов. *Журн. физич. химии*. 2000. Т. 74. № 9. С. 1593-1598.
12. **Yang X., Moats M.S., Miller J.D., Wang X., Shi X., Xu H.** Thiourea-thiocyanate leaching system for gold. *Hydrometallurgy*. 2011. V. 106. P. 58-63. DOI: 10.1016/j.hydromet.2010.11.018.
13. **Marco D., Bellomo A., DeRobertis A.** Formation and thermodynamic properties of Ag(I) complexes with  $S_2O_3^{2-}$ ,  $SCN_2H_4$  and  $SCN^-$  as ligands. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1980. V. 42. N 4. P. 599-609.
14. **Каковский И.А., Поташников Ю.М.** Кинетика процессов растворения М.: Metallurgiya. 1975. 224 с.
15. **Панченко Е.В., Скаков Ю.А., Кример Б.И.** Лаборатория металлографии. М.: Metallurgiya. 1965. 440 с.
16. **Красильникова Ю.А., Чурсанов Ю.В., Старовойтов А.В., Луцки В.И.** Фотометрическое определение золота с тиокетонном Михлера и предварительным выделением соосаждением с теллуrom. *Вестн. ТвГУ. Сер. Химия*. 2016. № 3. С. 76-81.
17. **Perera W.N., Senanayake G., Nicol M.J.** Interaction of gold(I) with thiosulfate–sulfite mixed ligand systems. *Inorg. Chim. Acta*. 2005. V. 358. P. 2183-2190. DOI: 10.1016/j.ica.2004.09.058.
18. **Бектурганов Н.С., Гоголь Д.Б., Бисенгалиева М.Р., Мукушева А.С., Койжанова А.К., Осиповская Л.Л.** Расчет термодинамических свойств комплексов золота и серебра смешанного состава. *Журн. неорг. химии*. 2014. Т. 59. № 4. С. 492–499. DOI: 10.7868/S0044457X14040035.
19. **Пилипенко А.Т., Тананайко М.М.** Разнолигандные и разнометалльные комплексы и их применение в аналитической химии. М.: Химия. 1983. 224 с.
20. **Чурсанов Ю.В., Луцки В.И., Старовойтов А.В., Поташников Ю.М.** Кинетика окислительного растворения золота в смеси тиоцианата и тиомочевины. *Вестн. ТвГУ. Сер. Химия*. 2015. № 2. С. 52-60.
6. **Senanayake G.** Analysis of reaction kinetics, speciation and mechanism of gold leaching and thiosulfate oxidation by ammoniacal copper(II) solutions. *Hydrometallurgy*. 2004. V. 75. P. 55-75. DOI: 10.1016/j.hydromet.2004.06.004.
7. **Senanayake G.** The role of ligands and oxidants in thiosulfate leaching of gold. *Gold Bulletin*. 2005. V. 38. N 4. P. 170-179. DOI: 10.1007/BF03215257.
8. **Senanayake G.** Gold leaching by thiosulphate solutions: a critical review on copper(II)–thiosulphate–oxygen interactions. *Mineral. Eng.* 2005. V. 18. P. 995-1009. DOI: 10.1016/j.mineng.2005.01.006.
9. **Senanayake G., Zhang X.M.** Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part II: Effect of residual Cu(II), pH and redox potentials on reactivity of colloidal gold. *Hydrometallurgy*. 2012. V. 115-116. P. 21-29. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.11.010.
10. **Chursanov Yu.V., Potashnikov Yu.M., Gortsevich S.L.** The kinetics of silver oxidation with oxygen in solutions containing thiocyanate-thiourea and thiocyanate-thiosulfate mixtures. *Russ. J. Phys. Chem.* 2007. V. 81. N 2. P. 176-178. DOI: 10.1134/S0036024407020057.
11. **Potashnikov Yu.M., Chursanov Yu.V., Gortsevich S.L.** Kinetics of dissolution of silver sulphide in the presence of heterogeneous ligands. *Zhurn. Fizich. Khim.* . 2000. V. 74. N 9. P. 1593-1598 (in Russian).
12. **Yang X., Moats M.S., Miller J.D., Wang X., Shi X., Xu H.** Thiourea-thiocyanate leaching system for gold. *Hydrometallurgy*. 2011. V. 106. P. 58-63. DOI: 10.1016/j.hydromet.2010.11.018.
13. **Marco D., Bellomo A., DeRobertis A.** Formation and thermodynamic properties of Ag(I) complexes with  $S_2O_3^{2-}$ ,  $SCN_2H_4$  and  $SCN^-$  as ligands. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1980. V. 42. N 4. P. 599-609.
14. **Kakovskiy I.A., Potashnikov Yu.M.** The kinetics of dissolution. М.: Metallurgiya. 1975. 224 p. (in Russian).
15. **Panchenko E.V., Skakov Yu.A., Krimer B.I.** Laboratory of metallography. М.: Metallurgiya. 1965. 440 p. (in Russian).
16. **Krasil'nikova Yu.A., Chursanov Yu.V., Starovoytov A.V., Lutsik V.I.** Photometric determination of gold with thioketone Michler and pre-allocated by co-precipitation with tellurium. *Vestn. TvGU. Ser. Khimiya*. 2016. N 3. P. 76-81 (in Russian).
17. **Perera W.N., Senanayake G., Nicol M.J.** Interaction of gold(I) with thiosulfate–sulfite mixed ligand systems. *Inorg. Chim. Acta*. 2005. V. 358. P. 2183-2190. DOI: 10.1016/j.ica.2004.09.058.
18. **Bekturganov N.S., Gogol D.B., Bisengalieva M.R., Mukusheva A.S., Koyzhanova A.K., Osipovskaya L.L.** Calculation of thermodynamic properties of mixed composition complexes of gold and silver. *Zhurn. Neorg. Khimii*. 2014. V. 59. N 4. P. 492-499. DOI: 10.7868/S0044457X14040035 (in Russian).
19. **Pilipenko A.T., Tananayko M.M.** Heteroligand and mixed metal complexes and their application in analytical chemistry. М.: Khimiya. 1983. 224 p. (in Russian).
20. **Chursanov Yu.V., Lutsik V.I., Starovoytov A.V., Potashnikov Yu.M.** The kinetics of gold oxidative dissolution by thiourea-thiocyanate system. *Vestn. TvGU. Ser. Khimiya*. 2015. N 2. P. 52-60 (in Russian).

Поступила в редакцию 17.11.2017  
Принята к опубликованию 10.07.2018

Received 17.11.2017  
Accepted 10.07.2018