

Таким образом, данные проведенных исследований подтверждают возможность эффективной переработки продуктивных растворов месторождения Нурказган Северного участка по схеме SX-EW методом жидкостной экстракции с высокой степенью селективного извлечения меди.

Аналитические исследования физических и технологических свойств образцов показали, что разбавители имеют некоторые различия, но в целом их свойства аналогичны и обеспечивают сопоставимые характеристики жидкостной экстракции.

Растворители Elixore 205, Elixore 215 и ESCAID 110 показали схожие технологические свойства и подходят для большинства рабочих циклов жидкостной экстракции.

Библиографический список

1. *Ritcey G. M. Solvent Extraction, Principles and Applications to Process Metallurgy, Part I* / G. M. Ritcey, A. W Ashbrook. Elsevier. – New York, 1984. – P. 172–206.
2. *Calzada M. A. Comparison of Low Aromatic and Traditional Hydrocarbon Extraction Diluents in Copper Production* / M. A. Calzada, R. Kowalik, P. Y. Guymar // ISEC 2011, 19th International solvent Extraction Conference, October 3–7 2011, Santiago, Chile.
3. *Процессы и аппараты цветной металлургии* / под ред. С. С. Набойченко. – Екатеринбург : УГТУ УПИ, 2005. – 700 с.
4. *Бейсембаев Б. Б. Теория и практика кучного выщелачивания меди* / Б. Б. Бейсембаев, А. М. Кунаев, Б. К. Кенжалиев. – Алматы : Гылым, 1998. – 348 с. – ISBN 5-628-02396-5.

УДК 669.21+669.822+66.081

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОРБЦИИ ЗОЛОТА И УРАНА ИЗ СЕРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ТИОЦИАНАТ-ИОН

Собенников Р. М., Елифоров А. В., Шипнигов А. А.

АО «Иргиредмет», г. Иркутск, Россия

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследований по сорбции урана и золота ионообменными смолами из продуктивных растворов сернокислотного тиоцианатного выщелачивания окисленной золотоурановой руды. Также проведены исследования по выбору наиболее эффективного ионита для сорбции урана из исследуемых растворов. Рассмотрены следующие сильноосновные аниониты: макропористый анионит «D201» (КНР); гелевый анионит «Resinex™ HM-92-7-BG»; макропористый анионит «Resinex™ HM-P92-C» (Швеция); гелевый анионит «Lewatit® K 6367»; гелевый анионит «Lewatit® K 6362» (Германия). Представлены исследования по определению кинетики сорбции

урана на ионообменные смолы. Установлено, что минимальная продолжительность сорбции урана составляет 40 часов. Построены изотермы сорбции урана из растворов выщелачивания. Определено, что емкость ионитов может достигать более 50 мг/г и зависит от концентрации урана в растворе и от кислотности (показателя рН). Показана принципиальная возможность совместной сорбции золота и урана исследуемыми смолами.

Ключевые слова: золото, сорбция, ионообменные смолы, уран, серноокислотное выщелачивание, тиоцианатное выщелачивание.

Введение

Обычно при переработке золотоурановых руд и концентратов для извлечения урана используют серноокислотное выщелачивание, а для извлечения золота – цианирование [1]. Однако существуют и альтернативные цианированию варианты извлечения золота [2; 3]. Использование тиоцианатного выщелачивания золота в сернокислой среде позволяет совместно извлекать золото и уран в раствор в одну стадию. В этой связи исследования по сорбции золота и урана на иониты из растворов совместного серноокислотно-тиоцианатного выщелачивания золотоурановых руд являются весьма актуальными.

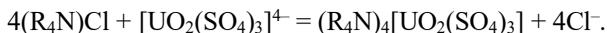
Научная значимость исследований по совместному извлечению золота и урана из растворов обусловлена динамично развивающимся прогрессом в области переработки минерального сырья, в частности золотоурановых руд, а также возможностью совместного выщелачивания золота и урана с использованием растворителей золота, работающих в сернокислых средах [3].

Обычно извлечение урана из продуктивных растворов с использованием ионообменных смол осуществляют по технологии RIP (resin-in-pulp/смола в пульпе) или RIS (resin-in-solution/смола в растворе). Технология RIP применяется при агитационном выщелачивании руд и концентратов, RIS – для извлечения урана из продуктивных растворов кучного или подземного выщелачивания [4].

Ионообменные смолы (иониты), как известно, представляют собой матрицу (каркас) в виде множества элементарных ячеек трехмерной структуры, образованных поперечно сшитыми линейными полимерами. Последние содержат фиксированные ионы, заряды которых компенсированы зарядами подвижных в порах матрицы ионов противоположного знака (противоионами). В качестве примера элементарных ячеек высокомолекулярной матрицы ионита могут служить ячейки, полученные сшиванием линейных полистирольных цепочек с помощью дивинилбензола (ДВБ) [4; 5].

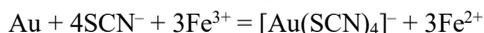
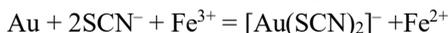
В серноокислом растворе существует подвижное равновесие между различными формами урана от катиона уранила (UO_2^{2+}) до четырехзарядного сульфатного анионного комплекса $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$. Соотношение между этими комплексами зависит от концентрации сульфат-иона и кислотности. При $\text{pH} < 1$ уран почти полностью находится в виде $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$.

В этом случае сорбция урана идет следующим образом:



При высокой кислотности наряду с ураном сорбируются и ионы бисульфата (HSO_4^-), обладающие довольно большим сродством к сильноосновным смолам. В силу этого при повышении кислотности емкость анионитов по отношению к урану уменьшается, особенно резко это сказывается у сильноосновных смол. При увеличении pH в пределах 1,5–5 концентрация анионных комплексов уменьшается и увеличивается концентрация недиссоциированных молекул уранил-сульфата $UO_2(SO_4)$ и катиона уранила [5].

Наиболее подходящим реагентом для выщелачивания золота совместно с ураном является тиоцианат-ион, т. к. условия, в которых работает данный реагент аналогичны условиям сернокислотного выщелачивания урана [2]: $pH < 3,0$, $Eh \geq 420-450$ мВ, в качестве окислителя используются ионы Fe^{3+} . Растворение золота протекает по реакциям:



При совместном сернокислотно-тиоцианатном выщелачивании золото-урановых руд будут образовываться продуктивные растворы, содержащие золото преимущественно в форме $[Au(SCN)_4]^-$ и урана в форме $UO_2(SO_4)$.

Целью проведения данных исследований являлось определение принципиальной возможности совместного извлечения золота и урана из сернокислых тиоцианатных растворов с использованием ионообменных смол.

Материалы и методики исследований

Для проведения исследований использовали раствор, полученный при проведении опытов по выщелачиванию золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами. Ионный состав раствора представлен в табл. 1.

Таблица 1

Ионный состав сернокислого тиоцианатного раствора

Компонент	Концентрация, мг/л	Компонент	Концентрация, мг/л
H_2SO_4	9600	Cu	1,87
SCN^-	349	Mg	202
Fe^{3+}	1120	Mo	0,02
Fe^{2+}	500	Mn	1747
Fe	1701	Zn	2,09
Co	2,01	U	10,5
Cd	< 0,005	Au	1,4
Al	428	Ag	< 0,05

Опыты по сорбции урана из исследуемого раствора проводили после предварительного извлечения золота активированным углем.

Сначала проводили поиск наиболее эффективного ионита для сорбции урана. Испытаны сильноосновные анионообменные смолы: макропористый анионит «D201» (КНР); гелевый анионит «Resinex™ HM-92-7-BG»; макропористый анионит «Resinex™ HM-P92-C» (Швеция); гелевый анионит «Lewatit® K 6367»; гелевый анионит «Lewatit® K 6362» (Германия).

Тесты по сорбции урана проводили в статических условиях в бутылочном агитаторе в течение 24 ч, объем раствора – 200 мл, массы навески смолы ($0,25 \pm 0,003$) г, рН раствора 0,8.

На смоле D201 была изучена кинетика сорбции урана при следующих условиях: объем раствора – 200 мл; масса навески смолы – 80 мг. Периодически отбирали пробы раствора для определения концентрации урана.

Проведена серия опытов по определению емкости исследуемых ионитов по урану. Был использован метод переменных навесок. В бутылки с 200 мл раствора загружали различные навески смол и через 92 ч определяли остаточную концентрацию урана в растворе. По результатам анализов строили изотермы сорбции. Сначала определяли емкость смолы D201 на исходном растворе. Далее для определения влияния рН на емкость ионитов по урану проведены тесты с различной исходной кислотностью раствора на смоле HM-P92-C. рН раствора в опытах составлял 1,1; 1,8 и 2,95. Для корректировки рН использовали оксид кальция. Также проведены опыты по определению емкости разных ионитов при оптимальном рН раствора (рН = 3).

Проведены тесты по совместной сорбции золота и урана на исследуемые иониты: объем раствора 200 мл; масса навески смолы ($0,5 \pm 0,03$) г; продолжительность сорбции 2 часа; температура 20–25 °С (комнатная). В растворах до и после сорбции определяли концентрации золота, урана, ионов железа (3+) и (2+).

Обсуждение результатов

Результаты сорбции урана на исследуемые смолы представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты сорбции урана на исследуемые смолы

Наименование смолы	Масса смолы, мг	Остаточная концентрация урана в растворе, мг/л	СОЕ, мг/г
D201	249	2,7	6,9
HM-92-7-BG	250	3	6,3
HM-P92-C	247	2,2	6,7
K 6367	252	3,1	5,9
K 6362	249	3,5	5,6

Показано, что содержания урана в изученных смолах близки, и незначительно большую емкость имеют макропористые аниониты D201 и НМ-Р92-С.

Тесты по сорбции урана на смолу D201 представлены на рис. 1.

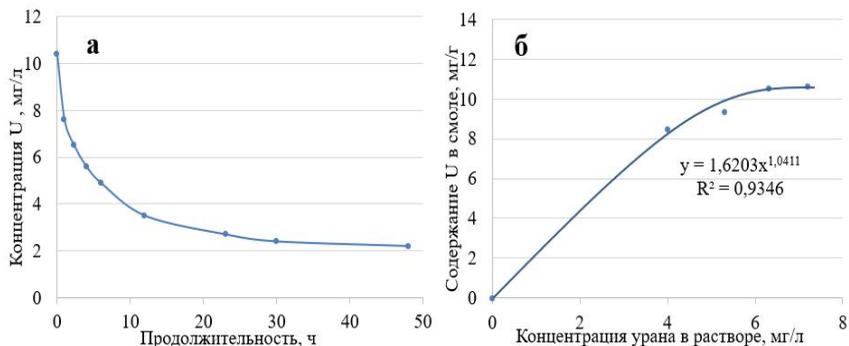


Рис. 1. а) кинетика сорбции урана из раствора; б) изотерма сорбции урана

Показано, что продолжительность сорбции урана из исследуемого раствора должна составлять не менее 40 ч. Максимальная емкость смолы D201 по урану составляет 10,6 мг/г при равновесной концентрации урана в растворе более 6 мг/л.

Изотермы сорбции урана на смолу НМ-Р92-С при различных рН и изотермы сорбции для ионитов НМ-Р92-С, К 6367 и D201 при рН = 3 представлены на рис. 2.

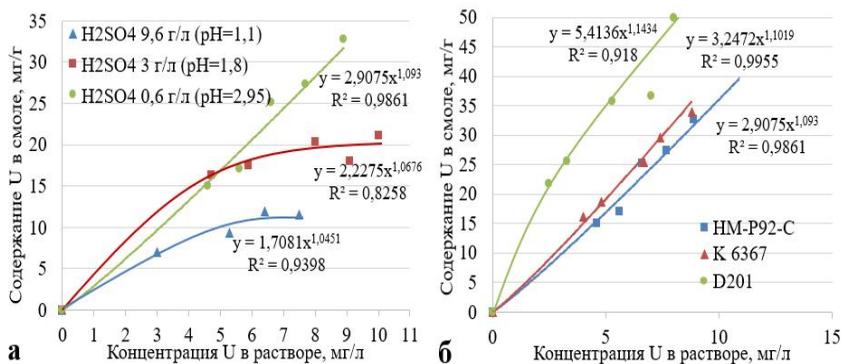


Рис. 2. а) изотермы сорбции урана на смолу НМ-Р92-С при различной кислотности раствора;
б) изотермы сорбции урана на различные смолы при рН = 3

Показано, что статическая емкость ионита увеличивается с уменьшением кислотности раствора. Так при минимальной кислотности

(рН около 3) емкость смолы возрастает до 33 мг/г, при этом равновесной емкости достигнуто не было (изотерма имеет линейный характер). Это можно объяснить недостаточной концентрацией урана в растворе для достижения равновесия концентраций между раствором и ионитом.

Показано, что смолы К 6367 и НМ-Р92-С имеют практически одинаковые сорбционные свойства. Лучший результат показал макропористый анионоит D201, емкость которого при равновесной концентрации урана в растворе 8 мг/л составило 50 мг/г. Стоит отметить, что при использовании столь бедного по урану раствора не на одной из исследуемых смол не было достигнуто статического равновесия.

В табл. 3 представлены показатели сорбции металлов из исходного исследуемого растворов на исследуемые смолы.

Т а б л и ц а 3

Показатели сорбции металлов на исследуемые смолы

Марка смолы	Масса смолы, г	Степень сорбции (извлечение), %			Объемная емкость, мг/г		
		Au	U	Fe	Au	U	Fe
НМ-92-7-BG	0,5	90,0	55,8	28,6	0,50	2,52	448
НМ-Р92-С	0,5	92,1	57,5	35,7	0,52	2,60	560
D201	0,5	91,4	49,6	14,3	0,51	2,24	224
К 6367	0,53	95,2	62,8	14,3	0,50	2,68	211
К 6362	0,53	97,2	69,0	28,6	0,51	2,94	423

Показано, что извлечение золота находится в диапазоне 90,0–97,2 %, извлечение урана при данных условиях составило 49,6–69,0 %. Отмечено интенсивное попутное осаждение железа на иониты (14,3–35,7 %).

Из испытанных смол несколько лучшие показатели по извлечению золота и урана из раствора были получены с использованием гелевых анионитов фирмы Lewatit®.

Следует отметить, что представленные в таблице 3 данные указывают лишь на принципиальную возможность сорбции металлов исследуемыми смолами.

Выводы

Опыты по сорбции урана из сернокислотного тиоцианатного раствора на ионообменные смолы показали, что продолжительность сорбции должна составлять не менее 40 часов, емкость ионитов по урану зависит от рН раствора.

Тестовыми опытами показана принципиальная возможность совместной сорбции золота и урана из сернокислых тиоцианатных растворов. Данный вопрос требует дополнительной детальной проработки, что будет отражено в последующих исследованиях.

Библиографический список

1. *Котляр Ю. А.* Металлургия благородных металлов : в 2 т. / Ю. А. Котляр, М. А. Меретуков, Л. С. Стрижко. – Москва : АСМИ, 2002. – Т. 2. – 466 с. – ISBN 5-87623-148-7.
2. *Aylmore M. G.* Alternative Lixivants to Cyanide for Leaching Gold Ores / M. G. Aylmore // *Gold Ore Processing, Project Development and Operations* / M. D. Adams (Eds). – Elsevier, 2016. – Chapt. 27. – P. 447–484.
3. *Ширяева В. В.* Разработка технологического режима извлечения золота из комплексных золотоурановых руд с использованием роданидных растворов методом кучного выщелачивания / В. В. Ширяева // ГИАБ. – 2012. – № 7. – С. 403–412.
4. *Ласкорин В. Н.* Сорбционное извлечение урана из пульп и растворов / В. Н. Ласкорин // *Атомная энергия.* – 1960. – № 4(9). – С. 286–296.
5. *Нестеров В. Ю.* Иониты и ионообмен. Сорбционная технология при добыче урана и других металлов методом подземного выщелачивания / В. Ю. Нестеров. – Москва : ОАО «Атомредметзолото», 2007. – 480 с. – ISBN 978-5-94982-039-8.

УДК 544.726 : 669.231.34 : 669.234

СОРБЦИЯ ПЛАТИНОИДОВ НА СОВРЕМЕННЫХ ИОНИТАХ ИЗ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ

**Зелях Я. Д.^{1,2}, Зверева А. А.¹, Кузьменко А. В.¹,
Воинков Р. С.¹, Тимофеев К. Л.¹, Мастюгин С. А.¹**

¹ АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, Россия

² Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Проведены исследования сорбционного извлечения платиновых металлов из серебряных азотнокислых технологических растворов предприятия АО Уралэлектромедь на различных современных ионообменных смолах. Эмпирическим путем подтверждено нахождение платиноидов в азотнокислых растворах в виде разноионных заряженных комплексных соединений. В рамках данной работы были проведены эксперименты по сорбции платиновых металлов в динамических условиях. Определена селективность выбранных смол к платине и палладию. Вычислены значения динамической обменной емкости, построены зависимости равновесных концентраций металлов от пропущенного объема раствора азотнокислого серебра. Проведена кислая и водная отмывки сорбентов после сорбции, с последующей десорбцией. По циклам сорбции-десорбции построены графические зависимости содержания металлов платиновой группы в сорбентах в зависимости от стадии.

Ключевые слова: сорбция, металлы платиновой группы, азотнокислый раствор серебра, электролит, извлечение, элюирование, селективность