

УДК 669.21

Использование регрессионного анализа для математической обработки экспериментальных данных по азотнокислому выщелачиванию примесей из золотосодержащих катодных осадков

© В.В. Жмурова, А.Г. Абдусаломов

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

В статье рассматриваются проведенные экспериментальные исследования по очистке золотосодержащих катодных осадков от примесей тяжелых цветных металлов методом азотнокислого выщелачивания. Оптимальная концентрация азотной кислоты составила 354 кг/м^3 , степень перехода меди в раствор – 82,95 %, свинца – 4,55 %. Для оценки влияния концентрации азотной кислоты на степень выщелачивания меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков использовалась математическая обработка экспериментальных данных методом регрессионного анализа. Построенная математическая модель показала, что концентрации азотной кислоты оказывают значительное влияние на степень перехода меди и свинца в раствор.

Ключевые слова: золотосодержащие катодные осадки, выщелачивание, азотная кислота, медь, свинец, регрессионный анализ, математическая обработка, эксперимент

Regression Analysis Usage for Mathematical Processing of Experimental Data on Nitric Acid Leaching of Impurities from Gold-Containing Cathode Deposits

© Victoria V. Zhmurova, Abdusalomov Alisher Gafur Ugli

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

The article discusses the conducted experimental studies on the purification of gold-containing cathode deposits from impurities of heavy non-ferrous metals by the method of nitric acid leaching. The optimal concentration of nitric acid was 354 kg/m^3 , the degree of conversion of copper to solution was 82.95 %, and lead was 4.55 %. To assess the effect of nitric acid concentration on the degree of leaching of copper and lead from gold-containing cathodic deposits, mathematical processing of experimental data by regression analysis was used. The constructed mathematical model showed that nitric acid concentrations have a significant effect on the degree of transition of copper and lead into solution.

Keywords: gold-containing cathodic deposits, leaching, nitric acid, copper, lead, regression analysis, mathematical processing, experiment

Истощение запасов богатых по содержанию золота и серебра руд в России предопределяет необходимость вовлечения в переработку сложных золотополиметаллических рудных источников, различных отходов, содержащих драгоценные металлы. Данные процессы должны происходить с применением как традиционных, так и новых технологий [1–3]. Конечной продукцией золотодобывающих предприятий являются катодные осадки, сплав золота лигатурного, золото шлиховое, цементационные осадки и др. Чем выше содержание драгоценных металлов в данных продуктах, тем ниже стоимость последующего аффинажа [4].

При переработке золотосодержащих руд по цианисто-сорбционной технологии с применением активных углей конечной продукцией являются сплавы золота лигатурного. Исходным сырьем для них становятся катодные осадки, образующиеся путем десорбции угля и электролиза растворов, полученных по цианисто-сорбционной технологии при переработке золотосодержащих руд [5]. Данные материалы помимо драгоценных металлов содержат также Cu, Zn, Fe, Pb, SiO₂, CaO и др.

Состав исходного катодного осадка, полученного на одном из золотодобывающих предприятий России, определялся атомно-абсорбционным методом на оптико-эмиссионном спектрометре «VARIAN 730-ES» (CCS Services, Швейцария), данные приведены в таблице 1.

Состав катодных осадков

Химический состав катодных осадков, % масс.						
Au	Ag	Cu	Zn	Pb	Fe	Прочие* примеси %
17,42	14,90	58,00	0,91	7,69	1,00	0,08

* К прочим примесям относятся неметаллические соединения: CaO, Al₂O₃, S и др.

Как видно из данных таблицы 1, основными примесями в катодных осадках являются медь и свинец. Данные металлы при последующей операции плавки с флюсами переходят в сплав золота лигатурного, ухудшая его качество (неравномерное распределение золота в слитке, недостоверное опробование, образование штейновой фазы при плавке, большая аффинажная разница и т. д.) [6, 7].

С целью удаления примесей из золотосодержащих катодных осадков проведены экспериментальные работы по азотнокислomu их выщелачиванию [8, 9]. Как известно, на процесс выщелачивания влияет множество факторов: концентрация растворителя, соотношение жидкой и твердой фаз, крупность частиц, скорость перемешивания, температура и др. Основным фактором варьирования была выбрана концентрация растворителя (от 61,87 до 559,6 кг/м³). Масса навески катодных осадков составляла 100 г, отношение Ж:Т = 3:1, продолжительность выщелачивания – 2 ч. После обработки материала азотной кислотой растворы отфильтровывали, как выщелачивания промывали и затем анализировали на содержания меди и свинца.

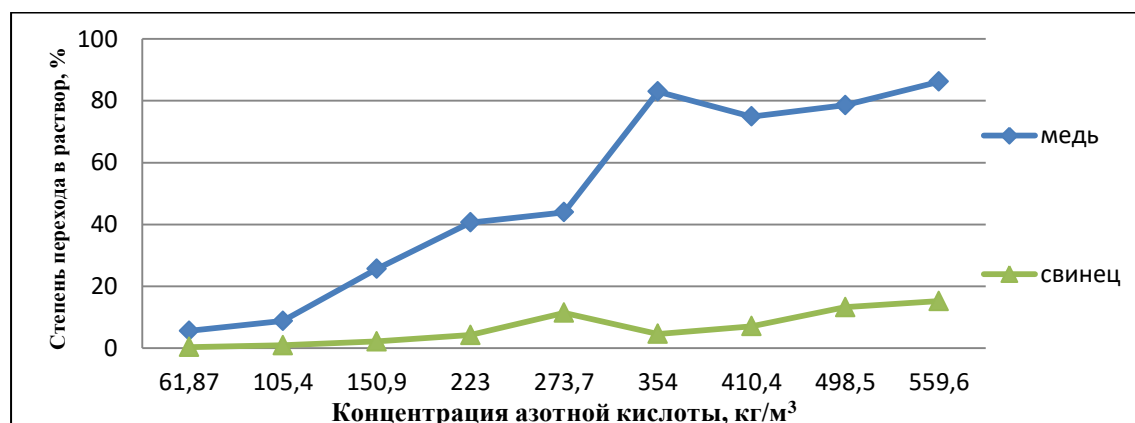
Исходя из полученных экспериментальных данных, были произведены расчеты степени перехода меди и свинца в раствор, каждый опыт дублировался дважды. Результаты расчетов были сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Степень перехода элементов в раствор

№	Концентрация азотной кислоты, кг/м ³	Медь		Свинец	
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 1	Опыт 2
1	61,87	5,59	5,51	0,30	0,30
2	105,4	6,92	10,56	0,89	1,03
3	150,9	27,20	23,95	2,36	1,92
4	223	37,70	43,47	3,99	4,43
5	273,7	42,36	45,50	11,52	11,23
6	354	81,97	83,93	4,55	4,55
7	410,4	72,91	76,83	7,02	7,02
8	498,5	79,24	77,86	14,82	11,57
9	559,6	89,21	83,12	14,17	16,12

На рисунке ниже изображена зависимость степени перехода меди и свинца в раствор (приняты средние значения результатов экспериментов) от концентрации азотной кислоты.



Зависимость степени перехода меди и свинца от концентрации азотной кислоты

Азотная кислота является эффективным растворителем меди из катодных осадков. Так, с ростом концентрации увеличивается переход меди в раствор, достигая максимума 82 % при 354 г/дм³. Степень перехода свинца низкая: при 559,6 кг/м³ достигает 15,15 %, это объясняется тем [10], что в результате взаимодействия Pb с HNO₃ и S не образуется растворимый PbNO₃, а образуется малорастворимый PbSO₄, что приводит к пассивации поверхности свинецсодержащих частиц:



Математическая обработка полученных экспериментальных данных методом регрессионного анализа

Математическую обработку полученных экспериментальных данных по азотнокислородному выщелачиванию примесей из золотосодержащих катодных осадков производят особым методом. Оценку более строгой зависимости между Y (степень перехода меди и свинца в раствор) и X (концентрации азотной кислоты) осуществляют с помощью регрессионного анализа. При этом исследуемая система должна удовлетворять следующим четырем требованиям (допущениям): 1. ошибки происходят в основном при измерении параметра Y , а не при задании факторов; 2. все опыты равнозначны. Они дают примерно одинаковую воспроизводимость измерения Y . Дисперсии в каждой серии опыта должны быть однородны; 3. погрешность измерения Y носит случайный характер и не имеет систематической составляющей; 4. погрешность измерений Y не зависит от опыта и имеет нормальное распределение [11–13]. Регрессионный анализ состоит из следующих этапов:

1. определяем дисперсию по каждому опыту

$$S_{i}^2 = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2, \quad (2)$$

где n – число опытов, y – значение извлечения, \bar{y} – среднее значение y .

Результаты расчетов представлены в виде таблицы 3.

Таблица 3

Результаты расчетов регрессионного анализа

Медь				
№ опыта	Y_1	Y_2	\bar{y}	S_i^2
1	5,59	5,51	5,55	0,0032
2	6,92	10,56	8,74	6,62
3	27,20	23,92	25,56	5,36
4	37,70	43,47	40,58	16,64
5	42,36	45,50	43,93	4,92
6	81,97	83,93	82,95	1,92
7	72,91	76,83	74,87	7,68
8	79,24	77,86	78,55	0,81
9	89,21	83,12	86,16	18,54
Свинец				
№ опыта	Y_1	Y_2	\bar{y}	S_i^2
1	0,30	0,30	0,30	0
2	0,89	1,03	0,96	0,0098
3	2,36	1,92	2,14	0,1
4	3,99	4,43	4,21	0,1
5	11,52	11,23	11,37	0,04
6	4,55	4,55	4,55	0
7	7,02	7,02	7,02	0
8	13,82	11,57	12,69	2,52
9	14,17	16,12	15,14	1,9

2. определяем сумму дисперсий всех опытов;

$$\sum_{i=1}^n S_i^2 = 62,49 \text{ (медь)}$$

$$\sum_{i=1}^n S_i^2 = 4,66 \text{ (свинец)}$$

3. определяем максимальную дисперсию;

$$S_{i\text{max}}^2 = 18,54 \text{ (медь)}$$

$$S^2_{imax} = 2,52 \text{ (свинец)}$$

4. находим расчетное значение критерия Кохрена

$$G_{расч} = \frac{S^2_{imax}}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (3),$$

где S^2_{imax} – значение максимальной дисперсии, $\sum_{i=1}^n S_i^2$ – сумма дисперсий всех опытов;

$$G_{расч} = \frac{18,54}{62,49} = 0,29 \text{ (медь)}$$

$$G_{расч} = \frac{2,52}{4,66} = 0,54 \text{ (свинец)}$$

5. оцениваем однородность дисперсий.

$G_{табл}$ для уровня значимости 0,05 и степеней свобод $f_1 = 1$, $f_2 = 9$ равно

$$G_{табл} = 0,6385$$

$$G_{расч} < G_{табл}$$

$$0,29 < 0,6385$$

$$0,54 < 0,6385$$

Следовательно, дисперсии однородны.

Заключение

При изучении химического состава катодных осадков было установлено, что основными примесями являются медь и свинец, которые необходимо предварительно удалить перед дальнейшей пирометаллургической переработкой. Экспериментальные исследования по азотнокислному выщелачиванию меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков показали эффективность данного способа. Оптимальная концентрация азотной кислоты составила 354 кг/м^3 , степень перехода меди в раствор – 82,95 %, свинца – 4,55%, это связано с образованием малорастворимого PbSO_4 , что привело к пассивации поверхности свинецсодержащих частиц. Для оценки влияния концентрации азотной кислоты на степень перехода примесей из катодных осадков в раствор была проведена математическая обработка экспериментальных данных по азотнокислному выщелачиванию примесей из золотосодержащих катодных осадков. Построенная математическая модель показала, что концентрации азотной кислоты влияют на степень перехода меди и свинца в раствор.

Библиографический список

1. Лодейщиков В.В. Техника и технология извлечения золота за рубежом. М.: Металлургия, 1973. 288 с.
2. Kyle J.H., Breuer P.L., Bunney K.G., Pleysier R. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. Part II: Deportment in gold ore processing by cyanidation // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 111–112. P. 10–21.
3. Ding Y., Zhang S., Liu Bo., Zheng H., Chang C.-C., Ekberg C. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: a review // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 141. № 2. P. 284–298.
4. Жмурова В.В. Совершенствование технологии получения золота лигатурного // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: матер. Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, апрель 2012 г.). Иркутск, 2012. С. 72–73.
5. Барченков В.В. Технология гидрометаллургической переработки золотосодержащих флотоконцентратов с применением активных углей. Чита: ООО «Книжное изд-во «Поиск», 2004. 242 с.
6. Меретуков М.А. Золото: химия, минералогия, металлургия. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2008. 528 с.
7. Баликов С.В., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г. Плавка золотосодержащих концентратов. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2002. 368 с.
8. Беленький А.М., Петров Г.В., Бодуэн А.Я., Куколевский А.С. Азотнокислное выщелачивание медеэлектролитных шламов // Записки горного института. 2006. Т. 169. С. 53–56.
9. Жмурова В.В., Карпухин А.И. Изучение состава катодного осадка, содержащего благородные металлы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 15. С. 208–215.
10. Валиев Х.Х., Романтеев Ю.П. Металлургия свинца, цинка и сопутствующих металлов. Алматы: Айкос, 2000. 441 с.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 284 с.
12. Горелова Г.В. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel. М.: Феникс, 2005. 395 с.
13. Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М.: МЦНМО, 2004. 32 с.

Жмурова Виктория Васильевна,

старший преподаватель кафедры металлургии цветных металлов,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,
e-mail: v_pichugina@list.ru

Victoria V. Zhmurova,

Senior Lecturer, Department of Non-Ferrous Metallurgy,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation,
e-mail: v_pichugina@list.ru

Абдусаломов Алишер Гафур Угли,

студент гр. МЦМ-18,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,
e-mail: abduosalomov.95@inbox.ru

Abdusalomov Alisher Gafur Ugli,

Student,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation,
e-mail: abduosalomov.95@inbox.ru