

А.Л. Самусев, Е.С. Томская

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ\*

Проведен анализ научно-технической литературы по физико-химическим и энергетическим методам интенсификации процесса выщелачивания золота из упорного минерального сырья. Обоснованы перспективы применения химико-электрохимического метода, включающего растворение золотосодержащих сульфидов водным раствором хлорида натрия с высокой концентрацией гипохлорит-ионов, образующихся в процессе электрохимической обработки раствора.

Ключевые слова: выщелачивание золота, упорные руды, электрохимическая обработка, продукт электролиза воды, арсенопирит, пирит.

**В** настоящее время в РФ упорные золотосодержащие руды перерабатываются в ограниченном количестве из-за отсутствия эффективной и экологически безопасной технологии, при этом они представляют собой крупный сырьевой источник получения золота. Основной проблемой переработки такого минерального сырья является нахождение золота в тесной связи с сульфидами (в виде тонкодисперсных или эмульсионных ассоциаций), что не позволяет достигнуть высокого уровня извлечения ( $\varepsilon < 50\text{--}70\%$ ) благородного металла традиционным гидрометаллургическим способом – цианированием [1, 2]. Так же одной из проблем переработки упорных золотосодержащих руд является частое наличие мышьяка (в виде арсенопирита), что приводит к усложнению технологии и ухудшению качества товарной продукции. В связи с этим, развитие эффективных методов переработки упорного золотосодержащего сырья является актуальной задачей.

К основным нетрадиционным методам повышения извлечения золота

из упорных сульфидных руд и продуктов обогащения можно отнести: реагентный метод (использование альтернативных растворителей); энергетические методы вскрытия минерального сырья (электрохимические, энергия ускоренных электронов, мощные электромагнитные импульсы и т.д.); бактериальное и автоклавное выщелачивание; пирометаллургический обжиг и т.д.

Поскольку использование высокотоксичных цианидов до сих пор вызывает противоречия и вопросы у защитников окружающей среды, то поиск новых растворителей, эффективно переводящих золото в раствор, остается весьма актуальной задачей, так как они должны обеспечивать достаточно высокую скорость выщелачивания при минимальной угрозе окружающей среде.

В термодинамическом отношении растворение золота возможно не только в цианистых, но и в других растворах, если в них имеются ионы или молекулы, образующие с золотом комплексы соединения: тиосульфаты; тиомочевина; галогениды ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$ );

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-3275.2015.5.

окислительные технологии с использованием хлорид-ионов (технология Nippon/Intec, Platsol); сульфидные системы ( $\text{HS}^-$ ,  $\text{S}$ ); тиоцианаты; цианид в сочетании с  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Br}$ .

К наиболее перспективным и наиболее изученным альтернативным технологиям выщелачивания золота можно отнести использование тиосульфатов, как реагентов для извлечения золота из упорных сульфидных руд (процесс Merrill-Crowe (Placer Dome), щелочное автоклавное выщелачивание (Barrick), частичное кислотное автоклавное окисление (Barrick), кучное выщелачивание (Newmont)), позволяющее достигнуть уровня извлечения золота 60–80%. Образующийся прочный тиосульфатный комплекс извлекают из пульпы за счет сорбции на ионообменниках. Однако для регенерации сорбента и получения комплекса золото-тиосульфат необходимо дополнительное использование для окисления тиосульфата иод, бром, перекиси водорода в значительных количествах.

Большой объем исследований и испытаний в полупромышленных масштабах по извлечению золота из различных минеральных продуктов проведен с применением тиомочевинных растворов [3–6]: месторождение золото-сурьмяных руд в Новой Англии, отвал хвостов переработки золото-медных руд на медном руднике Avoca (компания Rio Tinto), кучное выщелачивание с биоокислением (компания Newmont), рудник Boss Tweed (Монтана, США), флотационный концентрат (рудник Sonora), кучное выщелачивание (компания ВНР, г. Вествего, США) и др. Однако ряд современных исследований относят тиомочевину к канцерогенным веществам, что в негативно скажется на перспективности ее использования при выщелачивании золота.

Одним из эффективных и альтернативных цианированию методов является выщелачивание водными раст-

ворами хлора (гидрохлорирование), характеризующимися высокой окислительной и растворяющей способностью по отношению к сульфидам и золоту. Начиная с середины XIX в., гидрохлорирование золотосодержащих продуктов с применением солей хлорноватистой кислоты – гипохлоритов было успешно испытано на многих рудах. Однако отсутствие в то время эффективных способов получения хлора (гипохлорита) и коррозионно-устойчивого оборудования не позволило внедрить гидрохлорирование в промышленных масштабах.

В настоящее время широкое распространение получили технологии окислительного хлоридного выщелачивания, используемые для предварительного окисления упорных или углистых руд. Так, например, запатентованная компанией SGS технология PLATSOL включающая высокотемпературное (200–225 °С) выщелачивание под давлением (~700 кПа) с применением хлора, позволяет извлекать не только золото, но и содержащиеся металлы платиновой группы (МПГ), цветные металлы. Также большой объем исследований проведен с использованием композиций на основе галогенидов ( $\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ) и аммония ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  и др.), применяемые для предварительного вскрытия компанией Newmont Mining (рудники Jerritt Canyon и Emperor). Данные растворители, в отличие от серосодержащих, менее склонны к разложению в окислительных условиях, что снижает их расходы и увеличивает скорость растворения золота.

В меньшей степени исследованы процессы выщелачивания золота тиоцианатными растворами в виде выделения комплексных ионов  $[\text{Au}(\text{SCN})_n]^-$  [1, 7–10]. На основе термодинамического анализа системы  $\text{SCN}^- - \text{Au} - \text{H}_2\text{O}$  показано, что растворение золота обусловлено образованием прочных комплексов типа  $\text{Au}(\text{SCN})_2^-$ ,  $\text{Au}(\text{SCN})_4^-$ .

Выщелачивание золота из минеральных продуктов происходит наиболее эффективно при величине рН = 1–3 и концентрации тиоцианат-ионов 0,01–0,05 моль/л.

Таким образом, к главным недостаткам альтернативных растворителей можно отнести недостаточное извлечение золота, повышенный расход реагентов и необходимость применения коррозионностойких материалов для изготовления оборудования. Однако высокая токсичность цианидов и неприменимость цианидной технологии для извлечения золота из определенных типов рудного сырья являются основными причинами продолжающихся исследований в данной области. Из всех имеющихся технологий наиболее привлекательными и проработанными альтернативами цианированию представляются тиосульфатное и хлоридное выщелачивание.

В последние годы в ИПКОН РАН совместно с ИРЭ РАН, ЦНИГРИ МПР РФ и другими организациями проводятся исследования по использованию нетрадиционных энергетических воздействий для интенсификации вскрытия упорных золотосодержащих сульфидных руд. Если ранее данные методы считались экзотическими, то в настоящее время в связи с промышленным выпуском электрохимических кондиционеров, источников мощных электромагнитных полей и высокоэнергетических частиц появилась возможность реализации технологий.

Большинство энергетических методов направлено на разупрочнение минеральной матрицы за счет фазовых и структурных изменений поверхности, что облегчает доступ реагента-растворителя к частицам золота. Так, например, использование дополнительной электрохимической обработки золотосодержащего концентрата перед цианированием обеспечило прирост извлечения золота 17,4% [11].

При цианировании упорного пирит-арсенопиритного золотосодержащего концентрата, полученного из руды месторождения Нежданинское и предварительно облученного потоком ускоренных электронов в диапазоне доз излучения 0,2–0,8 Мрад, прирост извлечения золота в продуктивный раствор составил 23,3% [12].

В работах [13,14] показано, что воздействие мощными наносекундными электромагнитными импульсами на гравитационный концентрат (месторождение Нежданинское) позволило увеличить извлечение золота при цианировании на 31% (с 51,2% до 82,3%). Эффект повышения извлечения золота из сульфидов обусловлен механизмом создания каналов наносекундного электрического пробоя в минералах, дополнительных микротрещин и дефектов на границе срастания сульфидов с золотом, что подтверждается проведенными исследованиями микроструктуры сульфидных минералов (пирита и арсенопирита).

Однако все приведенные энергетические методы воздействия на упорные золотосодержащие продукты позволяют лишь частично снизить расходы высокотоксичных цианидов. При этом промышленная реализация ряда методов может существенно повысить энергозатраты на переработку золотосодержащих продуктов.

К наиболее проработанным и освоенным в промышленных масштабах методам предварительного вскрытия золотосодержащих сульфидов можно отнести окислительный обжиг и автоклавное окисление. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками, поэтому проблема их выбора и эффективного использования для каждого конкретного объекта (руда, концентрат) определяется исходя из особенностей вещественного состава, вида и причин упорности перерабатываемого сырья,

региональных и экономических условий работы горно-обогатительного предприятия.

Основным недостатком окислительного обжига является проблема вывода мышьяка при переработке арсеникопиритных руд, так как мышьяк переходит практически во все твердые продукты обжига, а также концентрируется в отходящих газах и стоках, что значительно усложняет технологию извлечения золота, ухудшает качество товарной продукции и загрязняет окружающую среду [15].

Совершенствование процесса автоклавного окисления связано главным образом с созданием и использованием новых конструктивных материалов для изготовления наиболее ответственных деталей автоклавов с целью повышения надежности и безопасности оборудования, эффективности работы систем нагрева и охлаждения пульпы до и после автоклавирования. Немаловажное значение при этом имеет осуществление мероприятий по повышению коэффициента использования кислорода, в том числе за счет вывода из газовой фазы «балластных» примесей ( $\text{CO}_2$  и др.).

Таким образом, в технологии переработки упорных тонковкрапленных руд одним из ключевых является процесс их вскрытия, обеспечивающий доступ выщелачивающего реагента к поверхности микро- и наночастиц золота. Современные методы вскрытия связаны со значительными расходами энергии и использованием более «жестких» окислителей (перекись водорода, хлор, бром, озон и др.).

Как было показано выше, на практике все более широкое распространение получают процессы связанные с использованием водных растворов хлора для вскрытия и выщелачивания золота из упорных руд и концентратов (гидрохлорирование). В настоящее время существует возможность

промышленной реализации более эффективного, чем гидрохлорирование, химико-электрохимического метода выщелачивания золота из упорного сульфидного минерального сырья. Сущность предлагаемого метода заключается в растворении золотосодержащих сульфидов водным раствором хлорида натрия с высокой концентрацией гипохлорит-ионов, образующихся в процессе электрохимической обработки раствора, при одновременной электрохимической поляризации сульфидов на электродах, изменяющей структуру, состояние и фазовый состав их поверхности [17]. При этом процессы электрохимического получения гипохлорита, поляризации сульфидов и непосредственного растворения золота совмещены в одном технологическом аппарате (электролизере) [18, 19]. Метод химико-электрохимического выщелачивания золота имеет следующие существенные преимущества по сравнению с другими известными методами и технологическими процессами:

- большая концентрация окислителя (молекулярного хлора) в растворе обуславливает высокую скорость процесса выщелачивания и перехода золота в раствор в виде хлоридных комплексов;
- возможность получения солянокислых растворов, из которых удобно выделять золото электролизом;
- повышение эффективности переработки ряда упорных для цианирования золотосодержащих материалов, в том числе углистых, медистых, мышьяковистых и других, а также разделения золота и серебра при их осаждении из солянокислых растворов.

Проведенный анализ современного состояния проблемы и известных методов извлечения золота из упорных сульфидных руд и концентратов позволил сделать выбор и обосновать перспективы применения химико-электрохимического метода, включающего обработку водным раствором, со-

держашим хлорид- и гипохлоритные ионы, восстановление металлов цементацией, регенерацию ионов гипохлорита электрохимическим способом и повторное использование выщелачивающего раствора.

хлорита электрохимическим способом и повторное использование выщелачивающего раствора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подейшиков В.В. Упорные золотые руды и основные принципы их металлургической переработки / Гидрометаллургия золота. – М.: Наука, 1980. – С. 5–18.
2. Палеев П.Л., Гуляшинов А.Н., Антропова И.Г., Гуляшинов П.А. Извлечение золота из упорных арсенопиритовых руд и концентратов // Золото и технологии. – 2013. – № 2(20). – С. 36–38.
3. Минеев Г.Г., Панченко А.Ф. Растворители золота и серебра в гидрометаллургии. – М.: Металлургия, 1994. – 241 с.
4. Подейшиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Монография в 2-х томах. Т. 2. – Иркутск: Иргиредмет, 1999. – 786 с.
5. Reuter M.A. Gold Hydrometallurgy: Theory and Practice // Gold Bull. Gr. Brit, 1999. – № 1. – P. 36.
6. Холмогоров А.Г., Кононова О.Н., Пашков Г.Л. // Журнал прикладной химии. – 2000. – Т. 73. – № 12. – С. 1924–1926.
7. Barbosa O., Monhemins A. Precious Metals-89: Proc. Intern. Symp. TMS Ann. Meet., Las-Vegas, Febr. 27 – March 2, Warrendale, 1989. – P. 307.
8. Чурсанов Ю.В., Гамаюнова Е.Ю., Каковский И.А. Растворение золота в кислых растворах роданидов // Известия РАН. Серия Металлы. – 1993. – № 4. – С. 54–58.
9. Брюквин В.А., Винецкая Т.Н., Левин А.М. Исследование гидроэлектро-химического поведения сульфидов никеля и меди в серноокислых растворах под действием переменного электрического тока // Известия РАН. Серия Металлы. – 1999. – № 2. – С. 19–24.
10. Пешевицкий Б.И., Еренбург А.М., Белеванцев В.М. Устойчивость комплексных соединений золота в водных растворах // Известия СО АН СССР. Серия Химические науки. – 1970. – Вып. 4. – № 9. – С. 75–83.
11. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д., Седельникова Г.В., Крылова Г.С. Нетрадиционные методы вскрытия упорных золотосодержащих руд и продуктов обогащения / Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: Монография / Под ред. М.И. Фазлулина. Т. 2. Золото. – М.: Руда и металлы, 2005. – С. 111–122.
12. Chanturiya V.A., Ivanova T.A., Lunin V.D., Nagibin V.D. Intensification of the dissolution process of rebellious gold-bearing products under action of a flow of accelerated electrons // Journal of Mining Science. – 2000. – Т. 36. – № 4. – С. 393–398.
13. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D., et al. Use of High-Power Electromagnetic Pulses in Process of Disintegration and Opening of Rebellious Gold-Containing Raw Materials // Journal of Mining Science. – 2001. – № 4. – С. 95–106.
14. Lunin V.D., Narseev A.V., Barashnev N.I., Ratnikov E.V. Model of process of microwave action on rebellious gold-containing concentrate. // Journal of Mining Science. – 1997. – № 4. – С. 89–94.
15. Палеев П.Л., Гуляшинов А.Н., Антропова И.Г., Гуляшинов П.А. Извлечение золота из упорных арсенопиритовых руд и концентратов // Золото и технологии. – 2013. – № 2(20). – С. 36–38.
16. Чантурия В.А., Федоров А.А., Чекушина Т.В., Зверев И.В., Зубенко А.В. Электрохимическая интенсификация процесса вскрытия упорных золотосодержащих руд // Горный журнал. – 1997. – № 10. – С. 51–55.
17. Чантурия В.А. Электрохимическая технология в обогащении гидрометаллургических процессах / Физико-технические проблемы разработки месторождений твердых полезных ископаемых. – М.: ИПКОН АН СССР, 1983. – С. 148–161.
18. Теут А.О., Куимов Д.В., Косьянов Э.А. Извлечение золота из упорных сульфидных руд методом электрохлоринации / Материалы международного совещания «Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья». – 2011. – С. 513–516.
19. Лузин Б.С., Голик В.И. Выщелачивание золота из некондиционного сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – № 4. – С. 84–88. **ИДБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Самусев Андрей Леонидович – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: Andrey63vzm@mail.ru, ИПКОН РАН,  
Томская Елена Семеновна – инженер, e-mail: letomskaya@ya.ru, ИПКОН РАН.



## MODERN APPROACHES TO STIMULATION OF GOLD LEACHING FROM REBELLIOUS MINERALS

Samusev A.L.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Researcher, e-mail: Andrey63vzm@mail.ru,  
Tomskaya E.S.<sup>1</sup>, e-mail: letomskaya@ya.ru,

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

*The analysis of scientific literature on the physical, chemical and energy process intensification techniques leaching of gold from refractory ore. Justified application prospects chemical-electrochemical method comprising dissolving gold sulfide aqueous sodium chloride solution with high concentration of hypochlorite ions formed during the electrochemical treatment of solution.*

*Key words: leaching of gold, refractory ore, electrochemical treatment, water electrolysis products, arsenopyrite, pyrite.*

### ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the RF President's Grant for Governmental Support of Young Russian Scientists-Candidates of Sciences, Grant No. MK-3275.2015.5.

### REFERENCES

1. Lodeishchikov V.V. *Gidrometallurgiya zolota* (Hydrometallurgy of gold), Moscow, Nauka, 1980, pp. 5–18.
2. Paleev P.L., Gulyashinov A.N., Antropova I.G., Gulyashinov P.A. *Zoloto i tekhnologii*. 2013, no 2(20), pp. 36–38.
3. Mineev G.G., Panchenko A.F. *Rastvoriteli zolota i serebra v gidrometallurgii* (Solvents for gold and silver in hydrometallurgy), Moscow, Metallurgiya, 1994, 241 p.
4. Lodeishchikov V.V. *Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud*. Monografiya. T. 2. (Gold and silver recovery from rebellious ore. Monograph, vol. 2), Irkutsk, Irgiredmet, 1999, 786 p.
5. Reuter M.A. *Gold Hydrometallurgy: Theory and Practice*. *Gold Bull. Gr. Brit*, 1999, no 1. P. 36.
6. Kholmogorov A.G., Kononova O.N., Pashkov G.L. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2000, vol. 73, no 12, pp. 1924–1926.
7. Barbosa O., Monhemins A. *Precious Metals-89: Proc. Intern. Symp. TMS Ann. Meet.*, Las-Vegas, Febr. 27 March 2, Warrendale, 1989. P. 307.
8. Chursanov Yu.V., Gamayunova E.Yu., Kakovskii I.A. *Izvestiya RAN. Seriya Metall.* 1993, no 4, pp. 54–58.
9. Bryukvin V.A., Vinetskaya T.N., Levin A.M. *Izvestiya RAN. Seriya Metall.* 1999, no 2, pp. 19–24.
10. Peshchevitskii B.I., Erenburg A.M., Belevantsev V.M. *Izvestiya SO AN SSSR. Seriya Khimicheskie nauki*. 1970, issue 4, no 9, pp. 75–83.
11. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D., Sedel'nikova G.V., Krylova G.S. *Podzemnoe i kuchnoe vyshchelachivanie urana, zolota i drugikh metallov*: Monografiya. Pod red. M.I. Fazulina. T. 2. *Zoloto* (Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals: Monograph, Fazulin M.I. (Ed.), vol. 2, Gold), Moscow, Ruda i metally, 2005, pp. 111–122.
12. Chanturiya V.A., Ivanova T.A., Lunin V.D., Nagibin V.D. Intensification of the dissolution process of rebellious gold-bearing products under action of a flow of accelerated electrons. *Journal of Mining Science*. 2000. T. 36, no 4, pp. 393–398.
13. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D., et al. Use of High-Power Electromagnetic Pulses in Process of Disintegration and Opening of Rebellious Gold-Containing Raw Materials. *Journal of Mining Science*. 2001, no 4, pp. 95–106.
14. Lunin V.D., Narseev A.V., Barashnev N.I., Ratnikov E.V. Model of process of microwave action on rebellious gold-containing concentrate. *Journal of Mining Science*. 1997, no 4, pp. 89–94.
15. Paleev P.L., Gulyashinov A.N., Antropova I.G., Gulyashinov P.A. *Zoloto i tekhnologii*. 2013, no 2(20), pp. 36–38.
16. Chanturiya V.A., Fedorov A.A., Chekushina T.V., Zverev I.V., Zubenko A.V. *Gornyi zhurnal*. 1997, no 10, pp. 51–55.
17. Chanturiya V.A. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopayemykh* (Physico-technical problems of hard mineral mining), Moscow, IPKON AN SSSR, 1983, pp. 148–161.
18. Teut A.O., Kuimov D.V., Kos'yanov E.A. *Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Novye tekhnologii obogashcheniya i kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimogo prirodnogo i tekhnogen'nogo mineral'nogo syr'ya»* (Proceedings of International Conference on New Technologies for Beneficiation and Integrated Processing of Complex Natural and Technogenic Minerals), 2011, pp. 513–516.
19. Luzin B.S., Golik V.I. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2004, no 4, pp. 84–88.