

PRETRATAMENTUL BACTERIAN ȘI SOLUBILIZAREA CU TIOSULFAT AL UNUI MINEREU SULFIDIC CU AUR REFRACTAR

Irena I. Spasova, Marina V.
Nicolova, Plamen S. Georgiev and
Stoyan N. Groudev

*Catedra de Inginerie, Geoecologie,
Universitatea de Mine și Geologie “St.
Ivan Rilski”*

Abstract - Un minereu sulfidic care conține 4.1 g/t aur, majoritatea fin diseminat în pirită, a fost supus unei prelucrări în două etape pentru a extrage aceste metale prețioase. Prima etapă a constat în eliberarea de aur și argint din matricea sulfidică ca rezultat al oxidării sulfurii folosind bacterii chemolitotrofice acidofile. Aurul și argintul eliberate au fost solubilizați în a doua etapă folosind soluții care conțin tiosulfat și aminoacizi în calitate de agenți de complexare. Aproximativ 90% din aur și 70% din argint au fost extrase în acest mod timp de 20 de zile din 100 kg mostre solubilizate în coloane de percolare.

Introducere

Aurul fin diseminat în minerale sulfidice este refractar la percolare deoarece percolanții nu pot pătrunde în interiorul acestor minerale pentru a solubiliza aurul închis. Diversele bacterii chemolitotrofice acidofile pot oxida sulfuri în sulfați solubili și pot elibera acest aur. Oxidarea este realizată în soluții diluate de acid sulfuric în care aurul expus nu este practic solubil. Aurul rămâne în reziduurile solide după oxidarea bacteriană și este supus la percolare ulterioară cu reactanți adecvați cum ar fi cianura, tiosulfat și tiourea (Livesey-Goldblatt et al., 1983; Groudev și Groudeva, 1993; Neale et al., 2011). Pretratamentul bacterian al sulfaților care conțin aur este aplicat la scară comercială în special către concentrații de sulfat ca un proces cu flux continuu în unități care conțin câțiva reactanți cu agitare mecanică și aerare crescută aranjați în

BACTERIAL PRETREATMENT AND THIOSULPHATE LEACHING OF A REFRACTORY GOLD- BEARING SULPHIDE ORE

Irena I. Spasova, Marina V. Nicolova,
Plamen S. Georgiev and Stoyan N.
Groudev

*Department of Engineering Geoecology,
University of Mining and Geology “St.
Ivan Rilski”*

Abstract - A sulphide ore containing 4.1 g/t gold most of which finely disseminated in pyrite, was subjected to two-stage processing for extracting these precious metals. The first stage was connected with liberation of the gold and silver from the sulphide matrix as a result of the sulphide oxidation by means of acidophilic chemolithotrophic bacteria. The liberated gold and silver were solubilized during the second stage by solutions containing thiosulphate and amino acids as complexing agents. About 90% of the gold and 70% of the silver were extracted in this way for 20 days from 100 kg samples leached in percolation columns.

Introduction

Gold finely disseminated in sulphide minerals is refractory to leaching since the leachants can not penetrate inside these minerals to solubilize the enclosed gold. Different acidophilic chemolithotrophic bacteria are able to oxidize the sulphides to soluble sulphates and to liberate this gold. The oxidation is carried out in diluted sulphuric acid solutions in which the exposed gold is practically not soluble. This gold remains in the solid residues after the bacterial oxidation and is susceptible to the subsequent leaching by suitable reagents such as cyanide, thiosulphite and thiourea (Livesey-Goldblatt et al., 1983; Groudev and Groudeva, 1993; Neale et al., 2011). The bacterial pretreatment of gold-bearing sulphides is applied in commercial scale mainly towards sulphide concentrates as a continuous-flow process in units consisting of several reactors with mechanical stirring and enhanced aeration

serie. În unele cazuri, totuși, de ex., cu minereuri sulfidice de grad scăzut, pretratamentul oxidativ bacterian se realizează în bocșe realizate în special în acest scop. Bocșele de minereu pretratate sunt apoi percolate pentru recuperarea metalelor prețioase eliberate.

Diverse tipuri de bacterii chemolitotrofice pot fi folosite în procesul de oxidare bacteriană, unde acestea arată diferențe între reacțiile pe care le catalizează și în condițiile în care operează. În prezent, majoritatea operațiunilor industriale pentru pretratamentul bacterian de concentrații sulfidice care conțin aur folosesc culturi amestecate de bacterii chemolitotrofice mezofilice, mai ales a speciilor *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* și *Leptospirillum ferrooxidans*, care operează în mod optim la 35 – 41°C. Unele bacterii termofilice moderate, mai ales speciile *Acidithiobacillus caldus* și câteva specii din genul *Sulfobacillus*, care operează la 45 – 55°C, ca și unele bacterii extrem de termofile din genul *Sulfolobus* și *Acidianus* capabile să oxideze minerale sulfidice la 75 – 80°C au fost folosite de asemenea. Pretratamentul bacterian în bocșe ajută la scăderea temperaturilor și se bazează mai ales pe activitatea populațiilor amestecate de bacterii chemolitotrofice mezofilice (Olson et al., 2003; Watling, 2006; Rawlings and Johnson, 2007).

De obicei, pirita și arsenopirita sunt principalele minerale sulfidice care conțin aur. S-a aflat că în unele cazuri, extragerea finală de aur și argint de la concentrații pretratate bacterian depinde de gradul de oxidare a piritei. Totuși, în unele cazuri, este necesar să oxidăm numai o cantitate relativ mică de pirită pentru a reuși extrageri mari de aur și argint. Aceasta se datorează faptului că, în unele specimene de pirită, aceste metale prețioase se localizează mai ales în locurile defecte ale grilajului de cristal de pirită iar aceste locuri sunt atacate mai ales de bacteriile chemolitotrofice. Date similare sunt disponibile și pentru localizarea metalelor prețioase în alte minerale sulfidice, de ex. aur în calcopirită și argint în galenit.

În majoritatea operațiunilor industriale, percolarea aurului este îndeplinită prin intermediul soluțiilor de cianură. Totuși, cianurile sunt reactanți deosebit de toxici și pot cauza probleme serioase de mediu. În același timp, s-a

arranged in a series. In some cases, however, e.g. with low-grade sulphide ores, the bacterial oxidative pretreatment is carried out in heaps especially constructed for this purpose. The pretreated ore heaps are then leached for recovering the liberated precious metals.

Various types of chemolithotrophic bacteria can be used in the bacterial oxidation process, where these show differences in the reactions that they catalyze and in the conditions under which they operate. At present, most industrial operations for bacterial pretreatment of gold-bearing sulphide concentrates use mixed cultures of mesophilic chemolithotrophic bacteria, mainly of the species *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans*, which operate optimally at 35 – 41°C. Some moderately thermophilic bacteria, mainly of the species *Acidithiobacillus caldus* and of some species of the genus *Sulfobacillus*, operating at 45 – 55°C, as well as some extremely thermophilic bacteria of the genera *Sulfolobus* and *Acidianus* able to oxidize sulphide minerals at 75 – 80°C have been also used. The bacterial pretreatment in heaps proceeds at lower temperatures and is based mainly on the activity of mixed populations of mesophilic chemolithotrophic bacteria (Olson et al., 2003; Watling, 2006; Rawlings and Johnson, 2007).

Usually, pyrite and arsenopyrite are the main gold-bearing sulphide minerals. It has been found that in some cases the final extraction of gold and silver from bacterially pretreated concentrates depends on the degree of pyrite oxidation. In some other cases, however, it is necessary to oxidize only a relatively small amount of the pyrite for achieving high gold and silver extractions. This is due to the fact that in some pyrite specimens these precious metals are located mainly in the defect sites of the pyrite crystal lattice and these sites are preferentially attacked by the chemolithotrophic bacteria. Similar data are available also for the location of precious metals in other sulphide minerals, e.g. gold in chalcopyrite and silver in galena.

In most industrial operations the leaching of gold is carried out by means of cyanide solutions. Cyanides, however, are highly toxic reagents and can cause serious environmental problems. At the same time, it has been shown that gold and silver

arătat că aurul și argintul sunt percolate în mod eficient prin intermediul soluțiilor amoniacale de tiosulfat. În unele cazuri aminoacizii s-au adăugat la aceste soluții (Groudev et al., 1996). Aminoacizii au abilitatea de a complexa metale grele și prețioase (Gillard et al., 1973) și de a stabiliza tiosulfatul. S-a aflat că adăugarea unor aminoacizi la soluțiile de tiosulfat crește extragerea de aur și argint și scade consumul de tiosulfat (Groudev et al., 1993; Michel and Frenay, 1998; Freg and van Deventer, 2011). Sursa aminoacizilor care se folosesc în astfel de sisteme de percolare poate fi diferită. Cea mai atractivă din punct de vedere economic este utilizarea hidrolizelor proteice obținute din diverse produse de deșeuri bogate în proteine, inclusiv biomasa microbiană, și care conține amestecuri de diverși aminoacizi în proporții adecvate.

Acest document conține câteva informații dintr-un studiu asupra procesării minereului sulfidic de grad scăzut care conține aur, argint și câteva metale neferoase (cupru, zinc, plumb) prin intermediul unui proces de două stadii care include oxidarea bacteriană a sulfizilor care conțin metal ca un prim stadiu al procesului, urmat de percolarea alcalină a metalelor prețioase prin intermediul soluțiilor care conțin tiosulfat și aminoacizi ca al doilea stadiu.

Materiale și metale

Minereul sulfidic care conține metal din depozitul Zlata consta în principal în cuarț (84%) și sericit (8%). Minerale de argilă, carbonați (mai ales de calciu) și produse de oxidare (mai ales jarosite) au fost de asemenea detectate. Pirita a fost principalul mineral sulfidic din minereu, dar s-au găsit și galenit, calcopirită și sfalerită. Conținutul total de sulfizi din minereu era de aproximativ 2%. Pirita a fost principalul mineral care conține aur. Principala porțiune de particule de aur era de mai puțin de 1 micron. Galenitul a fost principalul mineral care conținea argint din minereu, dar argintul a fost prezent și în pirită. Datele referitoare la compoziția chimică și mineralogică din minereu sunt prezentate în Tabelele 1 - 3.

O cultură amestecată de bacterii

are leached efficiently by means of ammoniacal solutions of thiosulphate. In some cases amino acids have been added to these solutions (Groudev et al., 1996). Amino acids have the ability to complex precious and heavy metals (Gillard et al., 1973) and to stabilize thiosulphate. It has been found that the addition of some amino acids to the thiosulphate solutions increases the gold and silver extraction and decreases the thiosulphate consumption (Groudev et al., 1993; Michel and Frenay, 1998; Freg and van Deventer, 2011). The source of the amino acids being used in such leach systems can be different. The most attractive from an economical point of view is the utilization of protein hydrolysates obtained from different rich-in-protein waste products, including microbial biomass, and containing mixtures of different amino acids in suitable proportions.

This paper contains some data from a study on the processing of a low-grade sulphide ore containing gold, silver and some non-ferrous metals (copper, zinc, lead), by means of a two-stage process including the bacterial oxidation of the metal-bearing sulphides as a first stage of the process, followed by the alkaline leaching of the exposed precious metals by means of solutions containing thiosulphate and amino acids as a second stage.

Materials and Metals

The gold-bearing sulphide ore from the Zlata deposit consisted mainly of quartz (84%) and sericite (8%). Clay minerals, carbonates (mainly calcite) and oxidation products (mainly jarosites) were also detected. Pyrite was the main sulphide mineral in the ore but galena, chalcopirite and sphalerite were also present. The total content of sulphides in the ore was about 2%. The pyrite was the main gold-bearing mineral. The main portion of the gold particles was less than 1 micron in size. Galena was the main silver-bearing mineral in the ore but silver was present also in the pyrite. Data about the chemical and mineralogical composition of the ore are shown in Tables 1 - 3. A mixed culture of mesophilic acidophilic chemolithotrophic bacteria was used to oxidize the sulphide minerals in the ore and to liberate the gold and silver encapsulated in the sulphide crystal lattices. The culture consisted of

chemolitotroface acidofilice mezofilice a fost folosită pentru oxidarea mineralelor sulfidice din minereu și pentru eliberarea aurului și argintului încapsulate în grilajele cristalului sulfidic. Cultura consta în *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* și *Acidiphilium sp.* și s-a adaptat ulterior la minereu prin transferuri consecutive în suspensii cu densități crescânde de pulpă.

Acidithiobacillus ferrooxidans, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Acidiphilium sp.* and was preliminary adapted to the ore by consecutive transfers into suspensions with increasing pulp densities.

Tabelul 1. Date referitoare la compoziția chimică și mineralogică a minereului folosit în acest studiu

Table 1. Data about the chemical and mineralogical composition of the ore used in this study

Component	Content, %	Component	Content, %
Total sulphur	1.40	Quartz	84.2
Sulphide sulphur	1.25	Sericite	8.0
Sulphate sulphur	0.15	Sulphides	2.3
Iron	1.94	Iron oxides and hydroxides	1.4
Copper	0.12	Clay minerals (alumosilicates)	2.5
Zinc	0.05	Carbonates	1.0
Lead	0.19	Others	0.6
Gold	4.1 g/t		
Silver	17.0 g/t		

Tabelul 2. Fazele aurului și argintului în minereu

Table 2. Gold and silver phases in the ore

Phases of the precious metals	Distribution (in % from the relevant total content)	
	Au	Ag
Free metal	6.4	-
Metal encapsulated in iron oxides and hydroxides	18.5	16.1
Metal finely disseminated in sulphides	71.6	78.6
Metal finely disseminated in silicates	3.5	5.3
Total	100.0	100.0

Tabelul 3 Conținutul și distribuția metalelor prețioase în diverse fracțiuni ale dimensiunii particulelor din minereu

Table 3 Content and distribution of the precious metals in the different particle size fractions of the ore

Particle size fraction, mm	Yield, %	Content, g/t		Distribution, %	
		Au	Ag	Au	Ag
-1	21.2	6.0	26	31.1	32.5
+1 -5	30.1	4.2	18	30.9	32.0
+5 -10	28.4	3.7	14	25.6	23.4
+10 -15	20.3	2.5	10	12.4	12.1
Total	100.0	4.1	17	100.0	100.0

Experimente pentru determinarea efectului Experiments to determine the effect of the

oxidării prealabile a sulfurii la percolarea ulterioară a metalelor prețioase au fost îndeplinite prin intermediul tehnicii agitării flaconului. Flacoanele conțineau 100 ml de mediu nutritiv de Macintosh fără Fe^{2+} dar conțineau minereu de sulfid măcinat fin (mai puțin de 0.074 mm) la 20% (w/v) densitatea pulpei. Flacoanele erau inoculate cu 10% (v/v) de cultură bacteriană de fază târzie care conține 5.10^8 celule/ml crescute pe minereu. Cultivarea a fost îndeplinită într-un agitator rotativ (180 rpm) la 35°C pentru diverse perioade de timp (de la 7 la 21 zile) pentru a îndeplini diverse grade de oxidare sulfidică. Minereurile pretratate astfel au fost spălate de mai multe ori cu apă curată pentru a elimina acidul rezidual și apoi au fost supuse percolării metalelor prețioase prin intermediul unei soluții care conține 150 mM ioni de tiosulfat, o concentrație totală de aminoacizi de 50 mM, 10 mM ioni de sulfat, 15 mM ioni de cupru, cu un pH menținut în cadrul unei game de 9.5 – 10.0 prin amoniac. Percolarea s-a îndeplinit la 30°C timp de 48 ore.

Experimentele de coloană s-au îndeplinit în coloane mari cu o înălțime efectivă de 1800 mm și un diametru intern de 320 mm care conține 100 kg de minereu zdrobit la minus 15 mm.

Soluțiile de acid sulfuric diluate inițial (cu un pH de 1.9) care conțin bacterii chemolitotrofice (aproximativ 5.10^8 celule/ml), $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ și KH_2PO_4 în concentrații de aproximativ 0.2 și 0.1 g/l, respectiv ioni ferici (~ 3 g/l, mai ales în stare trivalentă) și oxigen dizolvat au fost reciclate prin coloane într-un mod de deschidere-blocare amestecat timp de 5 zile pentru a inocula minereul cu bacterii active. Apoi percolarea s-a îndeplinit prin modul ciclului de blocare folosind soluții care conțin 5 g/l acid sulfuric și s-a aplicat la o rată de irigare la 8 – 10 l/24 h. Amoniacul și ionii de fosfat au fost adăugați periodic pentru a le menține concentrațiile la niveluri mai mari de 0.05 g/l. Aerul a fost injectat din josul coloanelor pentru a menține oxigenul dizolvat în soluția poroasă la concentrații mai mari de 5 mg/l. Durata percolării a fost de 160 zile iar temperatura înăuntrul masei minereului din coloane varia între 20 – 24°C . Progresul

prior sulphide oxidation on the subsequent leaching of the precious metals were carried out by the shake-flask technique. The flasks contained 100 ml of the nutrient medium of Macintosh without Fe^{2+} but containing finely ground (less than 0.074 mm) sulphide ore at 20% (w/v) pulp density. The flasks were inoculated with 10% (v/v) late-log-phase bacterial culture containing 5.10^8 cells/ml grown on the ore. The cultivation was carried out on a rotary shaker (180 rpm) at 35°C for different periods of time (from 7 to 21 days) to achieve different degrees of sulphide oxidation. The ores pretreated in this way were washed several times with fresh waters to remove the residual acid and then were subjected to leaching of the precious metals by solution containing 150 mM thiosulphate ions, total amino acids concentration of 50 mM, 10 mM sulphite ions, 15 mM copper ions, with a pH maintained within the range of 9.5 – 10.0 by ammonia. The leaching was carried out at 30°C for 48 hours.

The column experiments were carried out in large columns with an effective high of 1800 mm and an internal diameter of 320 mm containing 100 kg of ore crushed to minus 15 mm.

Initially diluted sulphuric acid solutions (with a pH of 1.9) containing chemolithotrophic bacteria (about 5.10^8 cells/ml), $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and KH_2PO_4 in concentrations of about 0.2 and 0.1 g/l, respectively, ferric ions (~ 3 g/l, most in the trivalent state) and dissolved oxygen were recycled through the columns in a mixed open-lock mode for about 5 days to inoculate the ore with active bacteria. Then the leaching was proceeded by the lock cycle mode using solutions containing 5 g/l sulphuric acid and applied at an irrigation rate of 8 – 10 l/24 h. Ammonium and phosphate ions were added periodically to maintain their concentrations at levels higher than 0.05 g/l. Air was injected from the down end of the columns to maintain the dissolved oxygen in the ore pore solution at concentrations higher than 5 mg/l. The duration of leaching was 160 days and the temperature inside the ore mass in the columns varied within the range of 20 – 24°C . The

oxidării bacteriene a fost urmate de analizele soluțiilor de circulație pentru speciile feroase, ferice și de fier total, metalele neferoase, ioni de sulfat, pH, Eh, și numărul de bacterii chemolitotrofice oxidante la fier. Experimente triplicate au fost conduse la fiecare cultură iar deviațiile standard erau de până la 5%.

După pretratatamentul bacterian și spălarea pentru eliminarea acidului rezidual, minereurile pretratate la gradul dorit de oxidare au fost supuse la percolarea metalelor prețioase prin soluții cu compoziția menționată mai sus. Percolarea s-a îndeplinit la 21 – 23°C timp de 20 zile.

Soluțiile de percolare au fost pompate până în vârful coloanelor la o rată de 100 l/t minereu per 24 h. Efluenții coloanei pregnante care conțin aurul și argintul dizolvate periodic au fost tratați prin cimentare cu zinc metalic pentru a precipita aceste metale ca și concentrați amestecați de aur-argint. Soluțiile epuizate din unitățile de contrare au fost colectate în vase de regenerare unde apa și reactanții au fost adăugați la nivelurile dorite. Soluțiile de percolare ajustate astfel au fost apoi reciclate la coloane.

Analiza de elemente a mostrelor lichide din pretratatamentul bacterian și percolarea aurului a fost îndeplinită prin intermediul spectrometriei absorbției atomice și spectrometriei plasmă cuplate inductiv. Analiza de elemente a mostrelor solide a fost îndeplinită prin digestia și măsurarea concentrațiilor ionice în soluție prin metodele menționate mai sus. Analizele de control al aurului și argintului în mostrele solide înainte și după ce percolările au fost îndeplinite prin separare (testarea focului). Conținuturile de aminoacizi au fost determinate de un analizator aminoacid. Concentrația de tiosulfat a fost determinată titrimetric cu iod.

Izolarea, identificarea și enumerarea microorganismelor au fost îndeplinite prin metodele descrise altundeva (Karavaiko et al., 1988; Hallberg and Johnson, 2001).

Rezultate și discuții

Percolarea metalelor prețioase din minereul original ne-pretratat nu a fost eficient și numai

progress of the bacterial oxidation was followed by analyses of the circulating solutions for ferrous, ferric and total iron species, non-ferrous metals, sulphate ions, pH, Eh, and number of iron-oxidizing chemolithotrophic bacteria. Triplicate experiments were conducted with each culture and the standard deviations were within 5%.

After the bacterial pretreatment and the washing to remove the residual acid the ores pretreated to the desired degree of oxidation were subjected to leaching of the precious metals by solutions with the composition mentioned above. The leaching was carried out at 21 – 23°C for 20 days.

The leach solutions were pumped to the tops of the columns at a rate of 100 l/t ore per 24 h. The pregnant column effluents containing the dissolved gold and silver periodically were treated by cementation with metallic zinc to precipitate these metals as mixed gold-silver concentrates. The depleted solutions from the concentration units were collected in regeneration vessels where make up water and reagents were added to the desired levels. The leach solutions adjusted in this way were then recycled to the columns.

Elemental analysis of the liquid samples from the bacterial pretreatment and gold leaching was carried out by means of atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma spectrometry. Elemental analysis of the solid samples was carried out by digestion and measurement of the ion concentrations in solution by the above - mentioned methods. Control analyses of gold and silver in the solid samples before and after the leaching were carried out by cupellation (fire assay). The amino acids concentrations were determined by an amino acid analyzer. The thiosulphate concentration was determined titrimetrically with iodine.

The isolation, identification and enumeration of microorganisms were carried out by methods described elsewhere (Karavaiko et al., 1988; Hallberg and Johnson, 2001).

Results and Discussion

aproximativ 25% din aur și aproximativ 20% din argint au fost extrase prin tiosulfat (cu sau fără aminoacizi) sau prin procesul cianurii.

Experimentele inițiale asupra efectului gradului oxidării sulfidice la extragerea metalelor prețioase în timpul percolării ulterioare, îndeplinită prin tehnica agitării flaconului a dezvăluit faptul că diseminarea metalelor prețioase în sulfizi, mai ales în pirită, nu a fost omogenă și că bacteriile erau capabile să oxideze preferențial mai ales acele locuri din grilajele de cristal ale sulfizilor în care metalele prețioase erau localizate. S-a aflat că un grad de oxidare sulfidică de aproximativ 75 – 80% era suficient pentru a extrage aproximativ 90% din aur și aproximativ 65% din argint.

Oxidarea următoare a sulfizilor a avut ca rezultat o creștere relativ mică a extragerii de metale prețioase.

Experimentele de control prin procesul cianurii au dat rezultate similare.

Rezultate similare au fost obținute în timpul percolării de metale prețioase din minereul pretrat din coloane (Tabelul 4). Extragerea relativ scăzută de argint a fost legată cel puțin parțial de oxidarea galenitului care conține argint de sulfatul de plumb insolubil. Consumul reactanților în timpul percolării de metale prețioase în cantitate de 12.5 kg tiosulfat de amoniac, 3.7 kg hidrolizat proteic, 0.8 kg sulfat de cupru, 0.7 kg sulfid de amoniu și 5.1 kg amoniu per tonă de minereu.

The leaching of precious metals from the original, non-pretreated ore was not efficient and only about 25% of the gold and about 20% of the silver were extracted by thiosulphate (with and without amino acids) or by cyanidation.

The initial experiments on the effect of the degree of sulphide oxidation on the extraction of precious metals during the subsequent leaching carried out by the shake-flask technique revealed that the dissemination of the precious metals in the sulphides, especially in the pyrite, was not homogeneous and that bacteria were able to oxidize preferentially just these sites in the crystal lattices of the sulphides in which the precious metals were located. It was found that a degree of sulphide oxidation of about 75 – 80% was sufficient to extract about 90% of the gold and about 65% of the silver.

Further oxidation of the sulphides resulted in a relatively small increase of the extraction of the precious metals.

Control experiments by cyanidation gave similar results.

Similar results were obtained during the leaching of precious metals from the ore pretreated in the columns (Table 4). The relatively low extraction of silver was connected, at least partially, to the oxidation of the silver-bearing galena to the insoluble lead sulphate. The consumption of reagents during the leaching of the precious metals amounted to 12.5 kg ammonium thiosulphate, 3.7 kg protein hydrolysate, 0.8 kg copper sulphate, 0.7 kg ammonium sulphite and 5.1 kg ammonia per ton of ore.

Table 4. Efectul oxidării bacteriene prealabile a sulfizilor la extragerea de metale prețioase în timpul percolării ulterioare în coloane

Table 4. Effect of the prior bacterial oxidation of sulphides on the extraction of precious metals during the subsequent leaching in columns

Days since the start of the bacterial oxidation	Residual sulphide sulphur in the ore, g/t	Degree of sulphide oxidation, %	Metal extraction, %	
			Au	Ag
0	1.25	0	25.7	18.5
20	0.82	34.0	50.1	41.5

50	0.53	57.6	81.9	57.0
70	0.43	65.3	85.2	60.8
100	0.32	74.5	88.0	63.5
120	0.25	80.2	89.13	65.9
140	0.21	83.3	90.5	68.2
160	0.18	85.5	91.8	70.3

Gradul extragerii metalelor prețioase dizolvate din soluții pregnante prin cimentare a fost mai mare de 98%. Produsele din unități de cimentare au fost concentrați amestecați de aur-argint care conțineau cupru și zinc ca și componente valoroase. Percolarea acestor concentrați prin acid sulfuric la 75 – 80°C și în prezența oxigenului are ca rezultat o dizolvare selectivă a cuprului și a zincului. Aceste metale neferoase se pot recupera din soluții pregnante după percolarea prin diverse metode, de ex. prin extragerea solubilă plus extragerea electrică.

Concluzii

Rezultatele acestui studiu au dezvăluit faptul că oxidarea bacteriană prealabilă a minereurilor sulfidice refractare care conțin aur și de asemenea metale neferoase, poate fi combinată cu percolarea și recuperarea acestor metale neferoase. Numai plumbul nu este solubil în soluțiile de acid sulfuric diluate care se folosesc în astfel de operațiuni. Aceste procese pot fi îndeplinite în bocșe cu o construcție foarte asemănătoare cu cea a bocșelor care se folosesc în mod curent pentru percolarea bacteriană a cuprului. Minereurile pretratate astfel pot fi percolate eficient prin intermediul unor soluții relativ non-toxice care conțin tiosulfat și aminoacizi ca și reactanți de complexare a metalelor. Extragerile de metale prețioase prin astfel de soluții sunt în majoritatea cazurilor asemănătoare cu cele obținute prin procesul cianurii.

Bibliografie

Feng, D. and van Deventer, J.S.J., 2011. Rolul aminoacizilor în percolarea de tiosulfat a

The degree of extraction of the dissolved precious metals from the pregnant solutions by cementation was higher than 98%. The products from the cementation units were mixed gold-silver concentrates which contained also copper and zinc as valuable components, The leaching of these concentrates by sulphuric acid at 75 – 80°C and in the presence of oxygen resulted in selective dissolution of the copper and zinc, These non-ferrous metals can be recovered from the pregnant solutions after leaching by means of different methods, e.g. by solvent extraction plus electrowinning.

Conclusions

The results from this study revealed that the prior bacterial oxidation of refractory gold-bearing sulphide ores containing also non-ferrous metals can be combined with the leaching and recovery of these non-ferrous metals. Only lead is not soluble in the diluted sulphuric acid solutions which are used in such operations, These processes can be performed in heaps with a construction very similar to that of the heaps which are currently used for bacterial leaching of copper. The ores pretreated in this way can be efficiently leached by relatively non-toxic solutions containing thiosulphate and amino acids as metal-complexing reagents. The extractions of precious metals by such solutions in most cases are similar to those obtained by cyanidation.

References

Feng, D. and van Deventer, J.S.J., 2011. The role of amino acids in the thiosulphate

aurului, *Ingenieria mineralelor*, 23, 1022 – 1024.

Gillard, R.D., Hay, R.W. and Williams, D.R., 1973. Derivații metalici ai peptidelor aminoacizilor și proteinelor, În: *Aminoacizi, Peptide și proteine*, vol. 7, pp. 381 – 402, R.C. Sheppard, ed., *Societatea Regală de Chimie*, UK.

Groudev, S.N. and Groudeva, V.I., 1993. Biohidrometalurgia aurului: starea actuală și prospecte viitoare, În: *Proc. XVIII Congresul internațional de procesare a mineralelor*, Sydney, Australia, 23 – 28 Mai, 1993, pp. 1385 – 1387.

Groudev, S.N., Groudeva, V.I. and Spasova, I.I., 1993. Extragerea de aur și argint din minereuri de oxid prin intermediul percolării biologice și chimice combinate, În: *Tehnologii biohidrometalurgice*, vol. I, pp. 417 – 425, A.E. Torma, J.E. Wey and V.I. Lakshmanan, eds., *Societatea mineralelor, metalelor & materialelor*, Warrendale, PA.

Hallberg, K.B. and Johnson, D.B., 2001. Biodiversitatea procariotelor acidofilice, *Progrese în microbiologia aplicată*, 49, 37 – 84.

Karavaiko, G.I. and Moshniakova, S.A., 1971. Studiu asupra chimosintezei și rata procesului oxidativ bacterian și chimic în condițiile depozitelor de minereu de cupru-nichel din peninsula Kolsky, *Microbiologia*, 40, 551 – 557 (în rusă).

Karavaiko, G.I., Rossi, G., Agate, A.D., Groudev, S.N. and Avakyan, Z.A., (eds.), 1988. *Biogeotehnologia metalelor. Manual*, GKNT Centrul pentru proiecte internaționale, Moscova.

Livesey-Goldblatt, E., Norman, P. and Livesey-Goldblatt, D.R., 1983. Recuperarea aurului din minereul de arsenopirită/pirită prin percolarea bacteriană și procesul cianurii, în: *Progresul recent în biohidrometalurgie*, pp. 627 – 641, G. Rossi și A.E. Torma (eds.), *Associazione Mineraria Sarda*, Iglesias.

Michel, D. and Freney, J., 1998. Investigarea electrochimică a percolării aurului tiosulfat, în: *CD Activități ale Simpozionului de aur CIM, Întâlnirea anuală generală*, Institutul canadian de minerit, metalurgie și petrol, Montreal, Quebec, Canada.

leaching of gold, *Minerals Engineering*, 23, 1022 – 1024.

Gillard, R.D., Hay, R.W. and Williams, D.R., 1973. Metal derivatives of amino-acids peptides and proteins, In: *Amino-acids, Peptides, and Proteins*, vol. 7, pp. 381 – 402, R.C. Sheppard, ed., *Royal Society of Chemistry*, UK.

Groudev, S.N. and Groudeva, V.I., 1993. Biohydrometallurgy of gold: present-day status and future prospects, In: *Proc. XVIII International Mineral Processing Congress*, Sydney, Australia, 23 – 28 May, 1993, pp. 1385 – 1387.

Groudev, S.N., Groudeva, V.I. and Spasova, I.I., 1993. Extraction of gold and silver from oxide from oxide ores by means of combined biological and chemical leaching, In: *Biohydrometallurgical Technologies*, vol. I, pp. 417 – 425, A.E. Torma, J.E. Wey and V.I. Lakshmanan, eds., *The Minerals, Metals & Materials Society*, Warrendale, PA.

Hallberg, K.B. and Johnson, D.B., 2001. Biodiversity of acidophilic prokaryotes, *Advances in Applied Microbiology*, 49, 37 – 84.

Karavaiko, G.I. and Moshniakova, S.A., 1971. A study on chemosynthesis and rate of bacterial and chemical oxidative process under conditions of copper-nickel ore deposits of Kolsky peninsula, *Microbiologiya*, 40, 551 – 557 (in Russian).

Karavaiko, G.I., Rossi, G., Agate, A.D., Groudev, S.N. and Avakyan, Z.A., (eds.), 1988. *Biogeotechnology of Metals. Manual*, GKNT Center for International Projects, Moscow.

Livesey-Goldblatt, E., Norman, P. and Livesey-Goldblatt, D.R., 1983. Gold recovery from arsenopyrite/pyrite ore by bacterial leaching and cyanidation, In: *Recent Progress in Biohydrometallurgy*, pp. 627 – 641, G. Rossi and A.E. Torma (eds.), *Associazione Mineraria Sarda*, Iglesias.

Michel, D. and Freney, J., 1998. Electrochemical investigation of the thiosulphate gold leaching, In: *CD Proceedings of CIM Gold Symposium, Annual General Meeting*, The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal,

Neale, J.W., Gericke, M. and Ramcharan, K., 2011. Aplicarea biopercolării la sulfizii metalelor bază în Africa de Sud: prospecte și oportunități, În: Activități ale celei de-a 6a Conferință Sud-Africană privind Metalele Bază 2011, pp. 367 – 388.

Olson, G., Brierley, J.A. and Brierley, C.L., 2003. Recapitularea biopercolării partea B: progresul biopercolării: aplicarea procesului microbial de către industriile minerale, Microbiologie aplicată și biotehnologie, 63, 249 – 257.

Rawlings, D.E. and Johnson, D.B., 2007. Microbiologia biomineritului; dezvoltarea și optimizarea firmelor de oxidare a mineralelor, Microbiologie, 153, 315 – 324.

Watling, H.R., 2006. Biopercolarea mineralelor sulfidice cu accent pe sulfizii de cupru, - recapitulare, Hidrometalurgia, 84, 81 – 108.

Quebec, Canada.

Neale, J.W., Gericke, M. and Ramcharan, K., 2011. The application of bioleaching to base metal sulphides in Southern Africa: prospects and opportunities, In: Proceedings of the 6th Southern African Base Metals Conference 2011, pp. 367 – 388.

Olson, G., Brierley, J.A. and Brierley, C.L., 2003. Bioleaching review part B: progress in bioleaching: application of microbial process by the minerals industries, Applied Microbiology and Biotechnology, 63, 249 – 257.

Rawlings, D.E. and Johnson, D.B., 2007. The microbiology of biomining; development and optimization of mineral-oxidizing consortia, Microbiology, 153, 315 – 324.

Watling, H.R., 2006. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – a review, Hydrometallurgy, 84, 81 – 108.