



ӨОЖ 669.213.6

DOI: 10.31643/2021/6445.03



FTAMP 53.37.33

Study of biohydrometallurgical technology used to recover gold from ore at a gold-recovery plant

^{1*}Koizhanova A.K., ²Sedelnikova G.V., ¹Erdenova M.B., ¹Berkinbaeva A.N., ¹Kamalov E.M.

¹Satbayev University, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

²Separate subdivision "Geotechnological Center", JSC "Rosgeologia", Moscow, Russia

*Corresponding author email: aigul_koizhan@mail.ru, a.koizhanova@satbayev.university

ABSTRACT

The article contains the results of the studies performed for the biochemical extraction modes for mineral raw materials using thionic bacteria *Acidithiobacillusferrooxidans* of a certain strain capable to oxidize sulfide minerals. A representative sample of mineral raw materials was taken, and its physical and chemical studies were performed. The optimal conditions to leach mineral raw materials with biochemical solvents based on various factors (temperature, S:W) were established. Modern physical and chemical methods of analysis were used during the study: X-ray fluorescence, X-ray phase, mineralogical, electron probe, chemical analyzes, IR methods to study the phase composition of ores and changes in the structure of minerals. The chemical composition of the ore sample quartered and crushed up to a size of -0.074 mm is as follows, wt. %: SiO₂ - 60.11; Al₂O₃ 6.2; Zn 0.016; Cu 0.10; Fe - 2.5; S 0.50; Au - 3.67 g/t and Ag - 3.2 g/t. This paper discusses various options for agitational leaching with acid pre-wash, bacterial dissection and oxidative decomposition of minerals using sodium hypochlorite. The results obtained showed that the most effective method to increase the gold recovery is to perform bacterial oxidation of ore using acidophilic bacteria *At. Ferrooxidans* preliminarily adapted to the material composition of the test sample, followed by treatment with sodium hypochlorite solution and cyanidation. Biohydrometallurgical ore processing provides high gold recovery (78.1%).

Keywords: ore, gold, biochemical leaching, *At. ferrooxidans*, sodium hypochlorite, cyanidation.

Information about authors:

Candidate of Technical Sciences, head of the laboratory of special methods of hydrometallurgy. Satbayev University, Institute of Metallurgy and Beneficiation, 050010, st. Shevchenko, 29/133, Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0001-9358-3193. Email: aigul_koizhan@mail.ru, a.koizhanova@satbayev.university

Koizhanova Aigul Kairgeldyevna

Sedelnikova Galina Vasilievna

Doctor of Technical Sciences, Director of the Geotechnological Center Separate Subdivision, JSC Rosgeologia, Moscow, Russia, Kherson street, 43, building 3. email: gvsedelnikova@rusgeology.ru

Erdenova Maria Beisenbekovna

Master's degree, Junior Researcher, Laboratory of Special Methods of Hydrometallurgy, Satbayev University, Institute of Metallurgy and Beneficiation, 050010, st. Shevchenko, 29/133, Almaty, Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-7496-5097>, email: erdenova_mariya@mail.ru.

Berkinbaeva Ainur Nurkalievna

Candidate of Technical Sciences, Head of the Chemical Analytical Laboratory, Satbayev University, Institute of Metallurgy and Beneficiation, 050010, st. Shevchenko, 29/133, Almaty, Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-2569-9087>, email: ainur_kbk@mail.ru

Kamalov Emil Maksutovich

Senior Researcher, Laboratory of Special Methods of Hydrometallurgy, Satbayev University, Institute of Metallurgy and Beneficiation, 050010, st. Shevchenko, 29/133, Almaty, Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-6073-348X>, email: email-kamalov@mail.ru

Алтын шығаратын фабриканың кендерінен алтын алудың биогидрометаллургиялық технологиясы

^{1*}Қойжанова А.Қ., ²Седельникова Г.В., ¹Ерденова М.Б., ¹Беркінбаева А.Н., ¹Камалов Э.М.

¹Сатбаев Университеті, Металлургия және кен байыту институты, Алматы, Қазақстан

²«Геотехнологиялық орталық» жеке бөлімшесі, «Росгеология» АҚ, Мәскеу, Ресей

*Автордың электронды поштасы: aigul_koizhan@mail.ru, a.koizhanova@satbayev.university

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада сульфидті минералдарды тотықтыруға қабілетті, белгілі бір штаммы бар (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) тионды бактерияларын пайдалана отырып, минералды шикізатты биохимиялық ашу режимдерін зерттеу нәтижелері берілген. Минералды шикізаттың шағын сынама алынды және оған физикалық-химиялық зерттеулер жүргізілді. Минералды шикізатты әртүрлі факторларға (температура, К:С) негізделген биохимиялық еріткіштермен шаймалаудың оңтайлы шарттары анықталды. Зерттеу барысында талдаудың заманауи физикалық және химиялық әдістері: рентгенфлуоресценттік, рентгенфазалық, минералогиялық, электронды-зондтық, химиялық талдаулар, кендердің фазалық құрамын және минералдардың құрылымында болып жатқан өзгерістерді зерттеудің ИҚС әдістері қолданылды. Ірілігі -0,074 мм-ге дейін ұсақталған кен сынамаcының химиялық құрамы мынадай, мас. %: SiO₂ - 60,11; Al₂O₃ - 6,2; Zn - 0,016; Cu 0,10; Fe - 2,5; S - 0,50; Au - 3,67 г/т және Ag - 3,2 г/т. Бұл жұмыста алдын ала қышқылмен жуу, бактериялық ашу және минералдарды натрий гипохлоритімен тотықтырып ыдырату арқылы агитациялық шаймалаудың әртүрлі нұсқалары қарастырылады. Алынған нәтижелер алтынды алу көлемін арттырудың ең тиімдісі сыналатын сынаманың заттық құрамына алдын ала бейімделген (*At. ferrooxidans*) ацидофильді бактерияларын қолданып кенді бактериялық тотықтыру екендігін көрсетті. Содан кейін барып ерітіндіні натрий гипохлориті ерітіндісімен өңдеу және циандау керек. Кенді биогидрометаллургиялық өңдеу алтынды жоғары мөлшерде бөліп алуды қамтамасыз етеді (78,1 %).

Түйін сөздер: кен, алтын, биохимиялық шаймалау, *At. ferrooxidans*, натрий гипохлориті, циандау.

Мақала келді: 13 қаңтар 2021
Рецензенттен өтті: 05 ақпан 2021
Қабылданды: 22 ақпан 2021

Қойжанова Айгүл Қайыргелдіқызы	Авторлар туралы ақпарат: Техника ғылымдарының кандидаты, гидрометаллургияның арнайы әдістері зертханасының меңгерушісі. Satbayev University, Металлургия және кен байыту институты, 050010, Шевченко көшесі, 29/133, Алматы, Қазақстан, https://orcid.org/0000-0001-9358-3193 , email: aigul_koizhan@mail.ru .
Седельникова Галина Васильевна	Техника ғылымдарының докторы, Геотехнологиялық орталықтың жеке бөлімшесі, «Росгеология» АҚ директоры, Мәскеу, Ресей, Херсон көшесі, 43, 3 үй. email: gvsedelnikova@rusgeology.ru
Ерденова Мәрия Бейсенбекқызы	Магистр, гидрометаллургияның арнайы әдістері зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Satbayev University, Металлургия және кен байыту институты, 050010, Шевченко көшесі, 29/133, Алматы, Қазақстан, https://orcid.org/0000-0002-7496-5097 , email: erdenova_mariya@mail.ru .
Беркінбаева Айнұр Нұрқалиқызы	Техника ғылымдарының кандидаты, химиялық аналитикалық зертхананың меңгерушісі, Satbayev University, Металлургия және кен байыту институты, 050010, Шевченко көшесі, 29/133, Алматы, Қазақстан, https://orcid.org/0000-0002-2569-9087 , email: ainur_kbk@mail.ru
Камалов Эмиль Максұтович	Гидрометаллургияның арнайы әдістері зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Металлургия және кен байыту институты, 050010, Шевченко көшесі, 29/133, Алматы, Қазақстан, https://orcid.org/0000-0002-6073-348X , email: emil-kamalov@mail.ru .

Кіріспе

Алтын гидрометаллургиясының маңызды мәселесі – қиын алынатын кендер мен техногендік қалдықтардан алтынды алудың тиімді тәсілдерін іздеу. Қазақстан Республикасының алтын қорын ұлғайтуға мүмкіндік беретін жаңа кен орындарының ашылуына және пайдаланылуына қарай оның өзектілігі барынша артып келеді.

Алтын кені шикізатын қайта өңдеу саласындағы қазіргі жағдайды бағалау бүгінгі таңда негізгі проблемаларды тұжырымдауға мүмкіндік береді. Ең алдымен, олар өнеркәсіптік тәжірибеде жалпы қабылданған әдістермен өңдеуге келмейтін технологиялық жағынан тұрақты кендер мен концентраттардың болуымен байланысты. Екіншіден, қайта өңделетін алтын кенінің шикізат сапасының нашарлауы. Үшіншіден, соңғы жылдары

қоршаған ортаны қорғауға қойылатын талаптардың күрт өсуі, себебі қоршаған ортаға кері әсер ететін кен байыту фабрикаларының қалдық қоймаларында алтынның айтарлықтай мөлшері бар [1].

Қазіргі уақытта алтын өндіретін кәсіпорындардың көпшілігі циандауды қолданады, оны әртүрлі байыту схемаларына енгізіп отыр.

Цианидті тәсіл барлық тұрақты кендерден сеппеленген және аралас жұқа дисперсті алтынды (20-60 %) жоғары мөлшерде алуды қамтамасыз етпейді және бұл мөлшерге (80-90% және одан да көп) тұрақты алтынды тесіп, күйдіру, автоклавты тотықтыру, цементтеу және басқа да тәсілдермен ашудың алдын ала (циандауға дейін) процестерін пайдаланған жағдайда қол жеткізіледі. Циандауды қолдану қоршаған ортаға кері әсерін тигізеді. Кен шикізатын биототықтыру процестеріндегі

Acidithiobacillus ferrooxidans (At. *ferrooxidans*) бактерияларының рөлі кеңінен танымал. Қазіргі уақытта АҚШ, Мексика, Испания, Австралия, Португалия және т.б. елдерде микроағзалар алтынды және бірқатар басқа да металдарды алу үшін қолданылады [2].

Кен шикізатынан алтынды және бірге жүретін металдарды биототықтыру барынша қолайлы, шығын аз кететін және экологиялық жағынан қауіпсіз әдіс ретінде қарастырылады [3-10].

Жұмыстың мақсаты сульфидті минералдарды тотықтыруға қабілетті *At. ferrooxidans* тионды бактерияларын пайдалана отырып, алтын шығару фабрикасының кенінен алтын алудың биогидрометаллургиялық технологиясын әзірлеу және зерттеу болды.

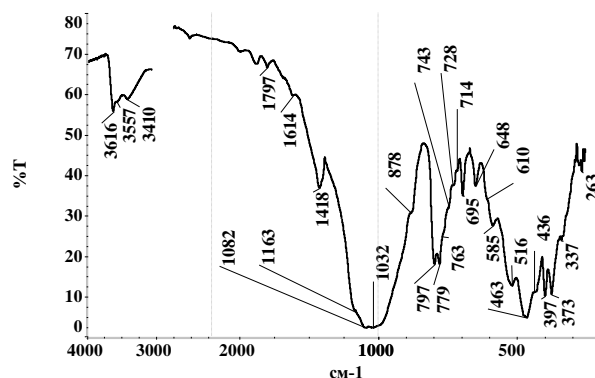
Эксперименттік бөлім

Зерттеу объектісі ретінде Ақбақай кен орнындағы құрамында алтын бар кен алынды, ол -0,074+0 мм ірілік класына дейін сатылы түрде ұсақталып, әрі қарай технологиялық зерттеулер мен заттық құрамды зерттеу үшін сынамаларды (аспаларды) іріктеудің стандартты әдістемесіне сәйкес орташаланып, бөлінді. Зерттелетін кен сынамасының химиялық құрамы мынадай негізгі компоненттерден тұрады, %: Fe – 2,5; Sжалп – 0,50; As – 19,4; Zn – 0,016; Cu – 0,10; Au – 3,67 г/т; Ag – 3,2 г/т.

Кенді циандау өнімдеріне тиісінше атомдық-адсорбциялық (ерітінді) және сынамалық (кек) талдау түрлері жасалды.

Рентгенфлуоресцентті, рентгенфаза, ИҚ спектро-фотометриялық талдау әдістерін қолдана отырып, кеннің фазалық құрамына жүргізілген зерттеу олардың α -SiO₂ (кварц) - 1163, 1086, 797, 779, 694, 515, 464, 396, 372 см⁻¹ және негізгі фаза ретінде альбит түріндегі плагиоклазадан [NaAlSi₃O₈ + CaAl₂Si₂O₈] -1163, 763п, 743п, 727п, 648, 610п, 581п, 464, 436 см⁻¹, сондай-ақ мусковиттен (KAl₂[AlSi₃O₁₀](OH)₂) - 3619, 3409, 1618, 1035, 694, 436 см⁻¹, ортоклазадан K[(Si, Al)₄O₈] - 763п, 727п, 648, 581п, 436 см⁻¹, кальцит CaCO₃ - 1795, 1421, 878п, 714 см⁻¹, халькопирит CuFeS₂, пирит FeS₂, магнетит Fe₃O₄, гематит Fe₂O₃ және темір гидроксидтерінен – 3557, 763п, 463, 436 см⁻¹ тұратынын көрсетті. Me-O, Me-S байланыстарының көрінуі байқалатын ұзын толқынды бөлікте Fe²⁺-O – 372 см⁻¹; Cu²⁺-O (нитратта, сульфатта) – 336 см⁻¹; Cu⁺-O (тұздарда) – 263 см⁻¹ түріндегі байланыстардың валенттік ауытқуларына сәйкес

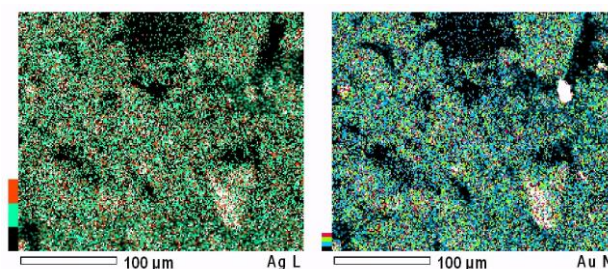
келетін 372, 336, 263 см⁻¹ толқындық сандар кезінде сіңіру жолақтары тіркелген (1-сурет).

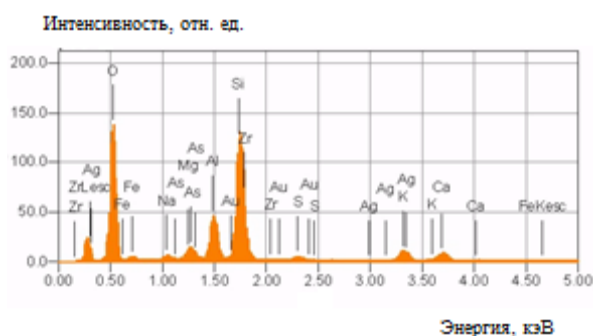


1-сурет – Кеннің бастапқы сынамасының инфрақызыл спектрі

Құрамында алтын бар кендерге кенді минералдардың болуы тән, олардың ішіндегі едәуір маңыздылары пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит болып табылады. Көптеген кенді минералдар кенсіз минералдарға (кварц, шақпақ тас) қарағанда, цианды ерітінділермен өзара әрекеттеседі және бұл кезде алтын мен күмістің еруіне айтарлықтай ықпал етеді [11-14]. Бұл жағдайда мыс, темір, мырыш, роданидтердің кешенді цианидтері түзіле отырып, оттегі мен цианидтің қатысуымен жанама реакциялар жүреді. Бұл ерітіндінің оттегімен жұтануына, бос цианид мөлшерінің төмендеуіне, және осылайша алтын мен күмістің еру жылдамдығының азаюына алып келеді. Сонымен бірге, алтын, әдетте, сульфидті минералдармен тығыз байланысты, сондықтан алтын мен күмісті барынша толық алу үшін сульфидтерді ашу қажет.

Негізгі сульфидті минерал — кеннің бастапқы үлгісінен бөлінген пиритті электронды-микроскопиялық зерттеулер энергодисперсиялық талдауышпен жабдықталған JEOL JXA-8230 растрлық электронды микроскопында (Жапония) орындалды. 2-суретте көріп отырғанымыздай, пириттің құрамында негізгі құрылымдық элементтер – темір мен күкірттен басқа алтын мен күміс те бар.





2-сурет – Кеннің бастапқы үлгісі сынамасының микроқұрылымы (а) және пириттің энергодисперсиялық талдауы

Мөлдір электронды микроскопия қызығушылық тудыратын микро және нанометр өлшемдерінің минералды фазаларын анықтауға, диагностикалауға және зерттеуге мүмкіндік береді. Электронды микроскопияның көмегімен кен бетінің әртектілігі анықталды. Бастапқы сынаманың нәтижелері беткі қабатта металдардың еруіне ықпал ететін оттегі атомдарының байқалғанын көрсетті.

Нәтижелерді талқылау

Қоректік орталарды таңдау және оңтайландыру микробиологиялық зерттеулер жүргізу кезіндегі маңызды міндеттер болып табылады. Орталарды таңдау кезінде биомассаның өсуі мен жинақталуына қажетті компоненттерді ғана емес, сонымен бірге микроағзалардың кейбір қиын сәйкестендірілетін топтарының оңтайлы өсуіне қажетті қосылыстарды да ескеру қажет [15-18]. Кеннен алтынды ашу және биошаймалаудың технологиялық параметрлерін анықтау үшін зерттелетін сынамаға бейімделген *At. Ferrooxidans* зертханалық штаммдары пайдаланылды [19]. Шаймалау ерітінділерінде: As, Sb, Fe²⁺, H₂SO₄, pH мөлшері және *At. Ferrooxidans* бактерияларының саны; циандау ерітінділерінде – Au, NaCN, NaOH; қатты қалдықта Au, Ag, As, Fe, S анықталды. Бұдан басқа, қатты материалдар бактериялық өңдеуге дейін және өңдеуден кейін кенді және кенсіз минералдарға және қатты материалдар құрамының құрылымдық өзгерістеріне талданды [20-25]. Ақбақай кен орнының кендерінен алтынды биохимиялық шаймалау учаскесінің негізгі операциялары: қоректік ортаны дайындау; бактериялардың биомассасын өсіру; шаймалауға арналған ерітіндіні дайындау; кенді биохимиялық шаймалау болып табылады.

Зерттеулер кезінде мынадай технологиялық операциялар орындалды: кенді бактериялардың тіршілік қызметіне кері әсерін тигізетін қоспалардың қалдықтарынан жуып-шаю (Қ:С=1:4; H₂SO₄ – 1-2 %; Т – 15-28 °С; агитация уақыты – 3 сағ.); жуылған кектен алтынды бактериялық ашу (Қ:С=1:4; pH – 1,5-2; Fe³⁺ - 5-6 г/дм³; *At. Ferrooxidans* бактерияларының мөлшері – 10⁷ кл/мл; агитацияның ұзақтығы – 5-7 тәулік); бактериялық өңдеуден кейін кекті бейтарап pH дейін жуып-шаю және pH = 10 дейін көтеру; циандау арқылы биошаймалау кектерінен алтынды алу (Қ:С=1:4; NaOH – 0,1-0,5 %; NaCN – 0,1-0,2 %; ұзақтығы – 24 және 36 сағ.).

Сіңіру қалдықтарын қайта өңдеудің оңтайлы параметрлері шаймалаудың әртүрлі нұсқаларын салыстыру арқылы таңдалды. Тәжірибе шарты төрт нұсқа бойынша жүзеге асырылды:

1. Алдын ала қышқылмен өңдеу (2 % H₂SO₄; Қ:С= 1:4; t = 15–25 °С; τ = 3 сағ.), кекті бейтараптандыру, агитациялық циандау (Қ:С= 1:4; 0,1–0,5 г/л NaOH; 0,1 % NaCN; = 18, 24 және 36 сағ.);

2. Алдын ала қышқылмен өңдеу (2 % H₂SO₄; Қ:С= 1:4; t = 15–25 °С; τ = 3 с), 5-7 тәулік бойы биототықтыру, кекті бейтараптандыру, циандау, (0,2 % NaCN, 1 % NaClO, Қ:С=1:1, уақыты – 18, 24 және 36 сағ.);

3. Алдын ала қышқылмен өңдеу (2 % H₂SO₄; Қ:С= 1:4; t = 15–25 °С; τ = 3 сағ.), 5-7 тәулік бойы биототықтыру, кекті бейтараптандыру, циандау, (0,2 % NaCN, 1 % NaClO, Қ:С=1:3, уақыты – 18, 24 және 36 сағ.);

4. Алдын ала қышқылмен өңдеу (2 % H₂SO₄; Қ:С= 1:4; t = 15–25 °С; τ = 3 сағ.), кекті бейтараптандыру, циандау, (0,2 % NaCN, 1 % NaClO, Қ:С=1:1, уақыты – 18, 24 және 36 сағ.).

Кенді тотықтыру құрамында 5,0-6,0 г/л Fe³⁺ бар, 3,0 г/л H₂SO₄ дейін болатын; pH = 2,5 кезінде; Қ:С=1:4, ұзақтығы 5-7 тәулік және *At. ferrooxidans* бактерияларының мөлшері 10⁷ кл/мл дейін болатын бактериялық ерітіндіні қолдана отырып жүргізілді. Биототықтырудың қатты қалдықтары (кек) бейтарап pH мәнге дейін сумен шайылды және одан әрі циандау жүргізілді (Қ:С=1:4; NaOH - 0,1 - 0,5 г/л, NaCN - 0,1 %; уақыты – 18, 24 және 36 сағ.).

Нәтижесінде кенді қайта өңдеудің әртүрлі нұсқалары бойынша алтынды алудың келесі көрсеткіштеріне қол жеткізілді: 1-ші нұсқа - 46,4; 2-ші нұсқа - 66,1; 3-ші нұсқа - 78,1; 4-ші нұсқа – 52,9. Алынған нәтижелер кенді бактериялық шаймалау кезінде сульфидтердің тотығатынын, берік алтынның ашылатынын және натрий

гипохлоритінің қатысуымен биототықтыру қалдықтарын одан әрі циандау кезінде алтынның алынатынын көрсетеді. Алтынды алу мөлшері кенді қайта өңдеудің 2-ші және 3-ші нұсқаларында тиісінше 66,1 және 78% дейін жетеді.

Эксперименттер 3-ші нұсқада одан әрі циандау арқылы бактериялық ашудан кейін және натрий гипохлоритінің қатысуы кезінде кеннен алтынды алу мөлшері 28 °C температура кезінде 78,1 % құрайтынын көрсетті.

Зерттеулердің нәтижесінде кеннен алтынды биошаймалау учаскесінің негізгі технологиялық операциялары: қоректік ортаны таңдау және дайындау, минералдық құрамға бейімделген бактериялардың биомассасын өсіру болып табылады.

Қорытындылар

Зерттелетін сынамадағы алтынның мөлшері 3,67 г/т, күміс - 3,2 г/т құрайтыны анықталды. Алтын пиритте ұсақ түйіршіктер түрінде болатыны анықталды. Микробиологиялық зерттеулердің нәтижесінде зерттелетін сынама

микрофлорасының құрамында негізінен сол кен орнының қазіргі технологиялық процестерінің шарттарына бейімделген гетеротрофты микроағзалар анықталғаны белгілі болды. *At. ferrooxidans* тионды темірді тотықтырғыш бактерияларының қарқынды өсуі мен дамуы үшін оңтайлы орта болып табылады.

Ақбақай кен орнының кендерін қайта өңдеудің биогидрометаллургиялық технологиясы әзірленді. Биототықтыру 5-7 тәулікке созылған кезде 36 сағаттың ішінде циандау арқылы алтынды алу мөлшері 78,1% құрайды.

Конфликт

Барлық авторлардың атынан корреспондент автор мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Алғыс білдіру

Зерттеу ҚР БҒМ Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды. (Грант N AP 08856780).

Осы мақалаға сілтеме: Қойжанова А. Қ., Седельникова Г. В., Ерденова М. Б., Беркинбаева А. Н., Камалов Э. М. Алтын шығаратын фабриканың кендерінен алтын алудың биогидрометаллургиялық технологиясы // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. №1 (316), б. 24-31 <https://doi.org/10.31643/2021/6445.03>

Cite this article as: Koizhanova A. K., Sedelnikova G. V., Erdenova M. B., Berkinbaeva A. N., Kamalov E. M. Altın şıġaratın fabrikaniñ kenderinen altın alwdıñ biogidrometallurgiyalıq tehnologiyası [Study of biohydrometallurgical technology used to recover gold from ore at a gold-recovery plant]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. № 1 (316), pp. 24-31. (In Kazakh). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.03>

Исследование биогидрометаллургической технологии извлечения золота из руды золотоизвлекающей фабрики

^{1*}Койжанова А. К., ²Седельникова Г. В., ¹Ерденова М. Б., ¹Беркинбаева А. Н., ¹Камалов Э. М.

¹ *Satbayev University, Институт Металлургии и Обогащения, Алматы, Казахстан*

² *Обособленное подразделение «Геотехнологический центр», АО «Росгеология», Москва, Россия*

* Электронная почта корреспондент-автора: aigul_koizhan@mail.ru, a.koizhanova@satbayev.university

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований режимов биохимического вскрытия минерального сырья с использованием тионовых бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* определенного штамма, способных окислять сульфидные минералы. Осуществлен отбор представительной пробы минерального сырья и проведены ее физико-химические исследования. Установлены оптимальные условия выщелачивания минерального сырья биохимическими растворителями исходя из различных факторов (температуры, Т:Ж). В процессе исследований применялись современные физические и химические методы анализа: рентгенофлуоресцентный, рентгенофазовый, минералогический, электронно-

*Статья поступила: 13 января 2021
Рецензирование: 05 февраля 2021
Принята в печать: 22 февраля 2021*

зондовый, химический анализы, ИКС методы исследования фазового состава руд и изменений, происходящих в структуре минералов. Химический состав измельченной до крупности - 0,074 мм пробы руды следующий, мас. %: SiO₂ - 60,11; Al₂O₃ - 6,2; Zn - 0,016; Cu 0,10; Fe - 2,5; S - 0,50; Au - 3,67 г/т Ag - 3,2 г/т. В данной работе рассматриваются различные варианты агитационного выщелачивания с предварительной кислотной промывкой, бактериальным вскрытием и окислительным разложением минералов с помощью гипохлорита натрия. Полученные результаты, показали, что наиболее эффективными для повышения извлечения золота рекомендуется проводить бактериальное окисление руды с применением ацидофильных бактерий *At. ferrooxidans*, предварительно адаптированных к вещественному составу исследуемой пробы, за которым следуют обработка раствором гипохлорита натрия и цианирование. Биогидрометаллургическая переработка руды обеспечивает высокое извлечение золота (78,1 %).

Ключевые слова: руда, золото, биохимическое выщелачивание, *At. ferrooxidans*, гипохлорит натрия, цианирование.

Койжанова Айгуль Кайргельдыевна	Информация об авторах: Кандидат технических наук, заведующая лабораторией спецметодов гидрометаллургии, Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, 050010, ул. Шевченко, 29/133, Алматы, Казахстан. ORCID ID: 0000-0001-9358-3193. Email: :aigul_koizhan@mail.ru, a.koizhanova@satbayev.university
Седельникова Галина Васильевна	Доктор технических наук, директор Обособленного подразделения «Геотехнологический центр», АО «Росгеология», Москва, Россия, Херсонская улица, д. 43, корпус 3. email: gvsedelnikova@rusgeology.ru
Ерденова Мария Бейсенбековна	Магистр, младший научный сотрудник лаборатории спецметодов гидрометаллургии, Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, 050010, ул. Шевченко, 29/133, Алматы, Казахстан, https://orcid.org/0000-0002-7496-5097 , email: erdenova_mariya@mail.ru.
Беркинбаева Айнур Нуркалиевна	Кандидат технических наук, заведующая химико-аналитической лабораторией, Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, 050010, ул. Шевченко, 29/133, Алматы, Казахстан, https://orcid.org/0000-0002-2569-9087 , email: ainur_kbk@mail.ru
Камалов Эмиль Максумович	Старший научный сотрудник, лаборатории спецметодов гидрометаллургии, Satbayev University, Институт металлургии и обогащения, 050010, ул. Шевченко, 29/133, Алматы, Казахстан, https://orcid.org/0000-0002-6073-348X , email: emil-kamalov@mail.ru

Литература

- [1] Дементьев В.Е., Дружина Г.Я., Гудков С.С. Кучное выщелачивание золота и серебра. – Иркутск: Иргиредмет. -2004. - 350 с.
- [2] Каравайко Г.И., Дубинина Г.А., Кондратьева Т.Ф. Литотрофные микроорганизмы окислительных циклов серы и железа // *Микробиология*. 2006. Т. 75, № 5. – С. 593-629.
- [3] Койжанова А.К., Арыстанова Г.А., Седельникова Г.В., Есимова Д.М. Исследование биогидрометаллургической технологии извлечения золота из хвостов сорбции золотоизвлекающей фабрики // *Цветные металлы*. 2016. № 9. – С. 52-56.
- [4] Седельникова Г.В., Савари Е.Е., Заулочный П.А., Кошель Е.А. Извлечение золота из упорных высокосульфидных концентратов с применением биогидрометаллургии // *Цветные металлы*. 2012. № 4. – С. 37-41.
- [5] Willner J., Fornalczyk A. Extraction of metals from electronic waste by bacterial leaching // *Environment protection engineering*. - 2013. Vol. 39, No. 1. - P. 197-208.
- [6] Смолянинов В. В., Шехватова Г. В., Вайнштейн М. Б. Выщелачивание золота политионатами (новые нетоксичные технологии) / *Цветные металлы* - 2012: сб. науч. статей. - Красноярск: Версо -2012. - С. 617-624.
- [7] Johnson D. B., Graill B. M., Hallberg K. B. A new direction for biomining: extraction of metals by reductive dissolution of oxidized ores // *Minerals*. 2013. No. 3 (1). P. 49-58.
- [8] Nancharaiyah Y. V., Venkata Mohan S., Lens P. N. L. Biological and bioelectrochemical recovery of critical land scarce metals // *Trends in Biotechnology*. - 2016. Vol. 34, No. 2. P. 137-155.
- [9] Hussin A. M. Ahmed, Ayman A. El-Midany. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria // *Materials Testing*. 2012. Vol. 54, No. 5. P. 351-357.
- [10] Koizhanova A.K., Toktar G., Craig E. Banks., Magomedov D.R., Kubaizhanov A.A. Research of hydrometallurgical method of leaching gold from flotation tails with using bio-oxidation. // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. - 2020. № 3 (314), pp. 28-39. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.24>
- [11] Койжанова А.К., Кенжалиев Б.К., Кульдеев Е.И., Камалов Э.М. Исследования технологии извлечения золота из отработанных штабелей руды кучного выщелачивания // *Обогащение руд*. - 2019. - № 3. - С. 54-59.
- [12] Hackl R.P., Wright F. R. Gormely L.S. Bioleaching of refractory gold ores-out of the lab into the plant // *Biohydrometallurgy*. 1989. – P.533-549.
- [13] Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. М., Недра, 1982. -286 с.
- [14] Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В. Чановый процесс бактериального выщелачивания. Технология и схемы переработки цветных металлов. // *Биогеотехнология металлов*, 1985. - С. 243.
- [15] Романенко Е.А., Косаковская И.В., Романенко П.А. Фитогормоны микроводорослей: биологическая роль и участие в

- регуляции физиологических процессов. Ч. II. Цитокинины и гиббереллины // Альгология. - 2016. Т. 26. - С. 203-229.
- [16] Чекунова Е. М., Яронская Е. Б., Ярцева Н. В., Аверина Н. Г. Новые факторы регуляции магний-хелатазы у зеленой водоросли *Chlamydomonas reinhardtii* // Физиология растений. 2014. Т. 61. - С.187–196.
- [17] Чекунова Е.М., Шалыго Н.В., Яронская Е.Б., Аверина Н.Г., Чунаев А.С. Регуляция биосинтеза предшественников хлорофилла у мутантов зеленой водоросли *Chlamydomonas reinhardtii* // Биохимия. 1993. Т. 58. Вып. 9. - С.70–73.
- [18] Attia Y.A. *Biotechnology in mineral processing*. 1990. Vol.42, №5, p.497.
- [19] Бектурганов Н. С., Арыстанова Г. А., Койжанова А. К., Ерденова М. Б. Сравнительное изучение эффективности способов извлечения золота из техногенных хвостов флотации // Цветные металлы. - 2016. № 10. –С. 69-72.
- [20] Kenzhaliyev B.K., Koizhanova A.K., Magomedov D.R., Kamalov E.M., Erdenova M.B., Abdyldaev N.N. A study of the biohydrometallurgical method for extracting gold from flotation tailings // *Metalurgija* - 2020. - Vol. 59. - №4. - pp.477 – 480.
- [21] Койжанова А. К., Ерденова М. Б., Осиповская Л. Л., Магомедов Д. Р., Даришева А. М. Совершенствование технологии кучного выщелачивания золота из упорных полиметаллических руд // Комплексное использование минерального сырья. - 2015. - № 1. - С. 30–36. <https://doi.org/10.31643/2018/166445>
- [22] Koizhanova A.K., Kenzhaliyev B.K., Kamalov E.M., Erdenova M.B., Magomedov D.R., Abdyldaev N.N. Research of gold extraction technology from technogenic raw material // *News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology*. 2020. Volume 1, Number 439. –P.95 – 101. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.12>
- [23] Kenzhaliyev B. K. Innovative technologies providing enhancement of nonferrous, precious, rare and rare earth metals extraction // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a (Complex Use of Mineral Resources)*. – 2019. – №3 (310). - Page: 64-75. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.30>
- [24] Yessengarayev Ye.K., Surimbayev B.N., Baimbetov B.S., Mamyachenkov S.V., Kanaly T.S. Ore treatment hydrogen peroxide during heap leaching of gold. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1(316), pp. 5-14. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01>
- [25] Койжанова А.К., Седельникова Г.В., Камалов Э.М., Ерденова М.Б., Абдылдаев Н.Н. К вопросу извлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательной фабрики // *Отечественная геология*. 2017. № 6. –С. 78-103.

Reference

- [1] Dement'yev V.Ye., Druzhina G.YA., Gudkov S.S. *Kuchnoye vyshchelachivaniye zolota i serebra*. [Heap leaching of gold and silver] – Irkutsk: Irgiredmet. -2004. -350 s. (in Russ).
- [2] Karavayko G.I., Dubinina G.A., Kondrat'yeva T.F. *Litotrofnyye mikroorganizmy oksilitel'nykh tsiklov sery i zheleza* [Lithotrophic microorganisms of oxidative cycles of sulfur and iron] // *Mikrobiologiya*. 2006. Т. 75. № 5. P. 593-629. (in Russ).
- [3] Koyzhanova A.K., Arystanova G.A., Sedel'nikova G.V., Yesimova D.M. *Issledovaniye biogidrometallurgicheskoy tekhnologii izvlecheniya zolota iz khvostov sorbtsii zolotoizvlekatel'noy fabriki* [Extraction of gold from refractory high-sulfide concentrates using biohydrometallurgy] // *Tsvetnyye metally*. 2016. № 9. P. 52 -56. (in Russ).
- [4] Sedel'nikova G.V., Savari Ye.Ye., Zaulochnyy P.A., Koshel' Ye.A. *Izvlecheniye zolota iz upornykh vysokosul'fidnykh kontsentratov s primeneniym biogidrometallurgii* [Extraction of gold from refractory high-sulfide concentrates using biohydrometallurgy] // *Tsvetnyye metally*. 2012. № 4. – P. 37–41. (in Russ).
- [5] Willner J., Fornalczyk A. Extraction of metals from electronic waste by bacterial leaching // *Environment protection engineering*. - 2013. Vol. 39, No. 1. - P. 197–208. (In Eng.).
- [6] Smolyaninov V.V., Shekhvatova G. V., Vaynshteyn M. B. *Vyshchelachivaniye zolota politionatami (novyye netoksichnyye tekhnologii)* [Leaching of gold with polythionates (new non-toxic technologies)] / *Tsvetnyye metally* - 2012: sb. nauch. statey. - Krasnoyarsk: Verso -2012. P. 617–624. (in Russ).
- [7] Johnson D. B., Grail B. M., Hallberg K. B. A new direction for biomining: extraction of metals by reductive dissolution of oxidized ores // *Minerals*. 2013. No. 3 (1). P. 49–58. (In Eng.).
- [8] Nancharaiah Y. V., Venkata Mohan S., Lens P. N. L. Biological and bioelectrochemical recovery of critical and scarce metals // *Trends in Biotechnology*. - 2016. Vol. 34, No. 2. P. 137–155. (In Eng.).
- [9] Hussin A. M. Ahmed, Ayman A. El-Midany. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria // *Materials Testing*. 2012. Vol. 54, No. 5. P. 351–357. (In Eng.).
- [10] Koizhanova A.K., Toktar G., Craig E. Banks., Magomedov D.R., Kubaizhanov A.A. Research of hydrometallurgical method of leaching gold from flotation tails with using bio-oxidation. // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. - 2020. № 3 (314), pp. 28-39. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.24>
- [11] Koizhanova A.K., Kenzhaliyev B.K., Kul'deyev Ye.I., Kamalov E.M. *Issledovaniya tekhnologii izvlecheniya zolota iz otrabotannykh shtabeley rudy kuchnogo vyshchelachivaniya* [Research on the technology of extracting gold from spent heap leaching ore piles] // *Obogashcheniye rud*. - 2019. - № 3. - P. 54-59. (in Russ).
- [12] Hackl R.P., Wright F. R. Gormely L.S. *Bioleaching of refractory gold ores-out of the lab into the plant* // *Biohydrometallurgy*. 1989. – P.533-549. (In Eng.).
- [13] Pol'kin S.I., Adamov E.V., Panin V.V. *Tekhnologiya bakterial'nogo vyshchelachivaniya tsvetnykh i redkikh metallov*. [Technology of bacterial leaching of non-ferrous and rare metals.] М., Nedra,1982. -286 p. (in Russ).
- [14] Pol'kin S.I., Adamov E.V., Panin V.V. *Chanovyyj process bakterial'nogo vyshchelachivaniya. Tekhnologiya i skhemy pererabotki cvetnykh metallov*. [Vat process of bacterial leaching. Technology and schemes for processing non-ferrous metals] // *Biogotekhnologiya metallov*, 1985. - S. 243. (in Russ).

- [15] Romanenko Ye.A., Kosakovskaya I.V., Romanenko P.A. Fitogormony mikrovdorosley: biologicheskaya rol' i uchastiye v regulyatsii fiziologicheskikh protsessov. CH. II. Tsitokininy i gibberelliny [Phytohormones of microalgae: biological role and participation in the regulation of physiological processes. Part II. Cytokinins and gibberellins] // *Al'gologiya*. - 2016. T. 26. - P. 203-229. (in Russ).
- [16] Chekunova Ye. M., Yaronskaya Ye. B., Yartseva N. V., Averina N. G. Novyye faktory regulyatsii magniy-khelatazy u zelenoy vodorosli *Shlamydomonas reinhardtii* [New factors of regulation of magnesium chelatase in green alga *Chlamydomonas reinhardtii*] // *Fiziologiya rasteniy*. 2014. T. 61. - P.187–196. (in Russ).
- [17] Chekunova Ye.M., Shalygo N.V., Yaronskaya Ye.B., Averina N.G., Chunayev A.S. Regulyatsiya biosinteza predshestvennikov khlorofilla u mutantov zelenoy vodorosli *Shlamydomonas reinhardtii* [Regulation of the biosynthesis of chlorophyll precursors in mutants of the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*] // *Biokhimiya*. 1993. T. 58. Vyp. 9. - P.70–73.(in Russ).
- [18] Attia Y.A. Biotechnology in mineral processing. 1990. Vol.42, №5, p.497. (In Eng.).
- [19] Bekturganov N. S., Arystanova G. A., Koyzhanova A. K., Yerdenova M. B. Sravnitel'noye izucheniye effektivnosti sposobov izvlecheniya zolota iz tekhnogennykh khvostov flotatsii [Comparative study of the efficiency of methods for recovering gold from technogenic flotation tailings] // *Tsvetnyye metally*. - 2016. № 10. –P. 69-72. (in Russ).
- [20] Kenzhaliyev B.K., Koizhanova A.K., Magomedov D.R., Kamalov E.M., Erdenova M.B., Abdyldaev N.N. A study of the biohydrometallurgical method for extracting gold from flotation tailings // *Metalurgiya* - 2020. - Vol. 59. - №4. - P.477 – 480. (In Eng.).
- [21] Koizhanova A. K., Yerdenova M. B., Osipovskaya L. L., Magomedov D. R., Darisheva A. M. Sovershenstvovaniye tekhnologii kuchnogo vyshchelachivaniya zolota iz upornykh polimetallicheskih rud [Improvement of heap leaching technology for gold from refractory polymetallic ores] // *Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya*. - 2015. - № 1. - P. 30–36. (in Russ). <https://doi.org/10.31643/2018/166445>
- [22] Koizhanova A.K., Kenzhaliyev B.K., Kamalov E.M., Erdenova M.B., Magomedov D.R., Abdyldaev N.N. Research of gold extraction technology from technogenic raw material // *News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology*. 2020. Volume 1, Number 439. –P.95 – 101. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.12> (In Eng.).
- [23] Kenzhaliyev B. K. Innovative technologies providing enhancement of nonferrous, precious, rare and rare earth metals extraction // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a (Complex Use of Mineral Resources)*. – 2019. – №3 (310). - Page: 64-75. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.30> (In Eng.).
- [24] Yessengarayev Ye.K., Surimbayev B.N., Baimbetov B.S., Mamyachenkov S.V., Kanaly T.S. Ore treatment hydrogen peroxide during heap leaching of gold. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1(316), pp. 5-14. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01>
- [25] Koizhanova A.K., Sedel'nikova G.V., Kamalov E.M., Yerdenova M.B., Abdyldayev N.N. K voprosu izvlecheniya zolota iz lezhalykh khvostov zolotoizvlekatel'noy fabriki [On the issue of extracting gold from stale tailings of a gold recovery plant] // *Otechestvennaya geologiya*. 2017. № 6. –P. 78-103. (in Russ).