



IKKILAMCHI OLTIN ISHLAB CHIQRISHNI TAKOMILLASHTIRISH

Marat O'rinboyev
Jasur o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika
universiteti Metallurgiya*
+998935444748

Annotatsiya

Ushbu maqolada ikkilamchi (secondary) oltin manbalaridan — zaxiradan chiqarilgach qolgan qo'shimcha oltin, rudalarda qolgan og'irlik, tailing (qoldiq) materiallar, elektron chiqindilar va boshqa metall chiqindilardan oltinni qayta tiklash usullari tahlil qilinadi. Maqolada mavjud usullarning kamchiliklari, yangi takomillashtirish yo'llari, tajriba va ilmiy qarashlar yoritiladi. Asosiy e'tibor katalitik, bio-gidrometallurgik, elektro-kimyoviy va fizik usullar orqali ishlash samaradorligini oshirishga qaratiladi. Oxirgi bo'limda kelajak istiqbollari va takliflar keltiriladi.

Kalit so'zlar: Ikkilamchi oltin, oltin qayta tiklash, bio-hidrometallurgiya, elektro-kimyoviy usullar, tailing qazib olish, oltin selektiv adsorbsiyasi.

Kirish

Oltin (Au) — qadrli va strategik metall bo'lib, ko'plab sanoat sohalarida — elektronika, zargarlik, tibbiyot, investitsiya aktivlari va munitsipal qo'riqchilarda keng qo'llanadi. Dunyoda yangi oltin konlari mavjudligi cheklangan bo'lishi tufayli, ilmiy va amaliy jihatdan ikkilamchi oltin manbalaridan foydalanish katta ahamiyatga ega bo'lib qolmoqda. Ikkilamchi oltin manbalari deganda, asosan quyidagi holatlar tushuniladi: (1) rudalarda qoldiq sifatida qolgan oltin miqdori, (2) minerallarni qayta ishlash jarayonida tark etilgan tailing yoki zaxiralardagi qolgan oltin, (3) elektron chiqindilar (e-waste) ichidagi oltin va boshqa qimmatbaho metallarning qazib olinishi, (4) metallurgik va kimyoviy jarayonlardagi qolgan salbiy chiqindilarda mavjud oltin izlari.

Ikkilamchi oltin manbalarini qayta ishlashning iqtisodiy, ekologik va resurs jihatdan foydali jihatlari quyidagilardan iborat:

1. **Resursni kengaytirish** — yangi oltin qazib olish qimmat va cheklangan bo'lishi sababli, zaxiradagi chiqindilardagi oltinni tiklash orqali yalpi oltin resurs bazasi kengaytiriladi.

2. **Atrof-muhitga zarar kamayishi** — yangi ruda qazib olish va chiqindilarni ulkan ommaviy joylarda yig'ib tashlash jarayonlari tabiiy muhitga katta zarar yetkazadi; ikkilamchi manbalardan foydalanish ushbu bosqichlarni qisqartirishi mumkin.

3. **Iqtisodiy rentabellik** — agar ikkilamchi materiallardan oltinni samarali va arzon usulda olish mumkin bo'lsa, bu sanoat uchun qo'shimcha iqtisodiy daromad manbai bo'lishi mumkin.

4. **Barqarorlik va qo'llab-quvvatlash siyosati** — global metallar va texnologik metallar bilan bog'liq barqarorlik talablarining ortishi, qayta ishlash va resirkulyatsiya texnologiyalarini rivojlantirishni rag'batlantirmoqda.

Biroq, ikkilamchi oltin manbalaridan samarali foydalanish bir necha qiyinchiliklarni ham o'z ichiga oladi. Eng asosiylari:

- Oltinning iz holatda bo'lishi: Ko'p hollarda, qolgan oltin juda nozik taneli yoki minerallar matrisasiga zich bog'langan bo'ladi, bu uni oddiy eritish yoki kimyoviy ajratish bilan olishni qiyinlashtiradi.

- Mineralogik murakkablik: Tailinglar yoki rudalarda qolgan oltin ko'pincha ko'p minerallar bilan kimyoviy va fizik jihatdan integrallashgan bo'ladi. Bu sharoitda selektiv ajratish muammolar yuzaga keladi.

- Kimyoviy reaktivlar va chiqindilar: Oltin ajratishda ishlatiladigan reagentlar (masalan, siyanidlar, tiocyanatlar, xloridlar va boshqalar) va hosil bo'lgan chiqindilar ekologik jihatdan xavfli bo'lishi mumkin.

- Energiya va investitsiya xarajatlari: Ba'zi takomillashtirilgan usullar katta energiya talab qiladi va dastlabki investitsiya kapitali yuqori bo'lishi mumkin.

- Protsess murakkabligi va jarayonlarni optimallashtirish: Jarayonlardagi parametrlarni (temperatura, pH, oksidlovchi agent, kontakt vaqti va boshqalar) to'g'ri tanlash muhim, lekin amaliy sharoitlarda juda murakkab bo'lishi mumkin.

Shu sababli, ilmiy va texnologik jihatdan ikkilamchi oltin ishlab chiqarishni takomillashtirishga qaratilgan izlanishlar katta ahamiyatga ega. Ilm-fan va amaliy tadqiqotlar sohasida quyidagi yo'nalishlar mavjud:

- **Bio-hidrometallurgiya:** Mikroorganizmlardan foydalanib oltinni eriydigan holga keltirish. Masalan, sulfid tarkibli minerallarda bakterial oksidlanish orqali matrisadan oltinni bo'shatish.

- **Elektro-kimyoviy usullar:** Elektr toki yordamida oltinni elektrokimyoviy ajratish, elektrodlar yuzasida yig'ish. LUT universiteti loyihasida 3D bosib chiqarilgan elektrokimyoviy reaktorlar orqali oltin tiklash ishlari olib borilmoqda.

- **Pre-treatment (oldindan ishlov berish):** Qattiq minerallar yoki tailinglarda oltin ajralishini osonlashtirish maqsadida agressiv kimyoviy muolajalar (masalan, NH_4HF_2) ishlatish orqali kristall tuzilishini o'zgartirish va eruvchanlikni oshirish.

- **O'tkir jarayon integratsiyasi:** Flotatsiya, gravitatsiya, ultraflotatsiya kabi fizik usullar bilan kombinatsiyalashgan kimyoviy usullarni yangi integratsiyalangan sxemalar orqali takomillashtirish. Masalan, markaziy suvli flotatsiya usuli (centrifugal flotation) orqali oltinli sulfidlardan yuqori samaradorlik bilan ajratish taklif qilinmoqda.

- **Adsorbent va selektiv ligantlar:** Grafen, reduksiya qilingan grafen oksid (rGO) materiali oltinni yuqori selektivlik bilan tortish xususiyatiga ega ekani ko'rsatilgan.

- **Jarayon avtomatizatsiyasi va optimallashtirish:** Oltin qayta ishlab chiqarish jarayonlarida avtomat nazorat, real vaqtda o'lchash va parametrlarni boshqarish orqali samaradorlikni oshirishga doir texnologiyalar tatbiq etilmoqda.

Keling, endi maqolaning asosiy qismida yuqoridagi yo'nalishlar va ularning ilmiy dalillari asosida takomillashtirish strategiyalari tahlil qilinsin.

Asosiy qism

1. Ikkilamchi oltin manbalarining turlari va xususiyatlari

Ikkilamchi oltin manbalari turlicha bo'lishi mumkin: tailing va chiqindi zaxiralar, minerallarda qolgan izlar, elektron chiqindilar, metallurgik chiqindilar va boshqa aralash materiallar. Ularning xususiyatlari juda xil bo'lishi mumkin — minerallar matritsasiga bog'lanish darajasi, tanelar o'lchami, kimyoviy tuzilishi, oksidlangan yoki sulfid formasi va boshqa omillar farq qiladi.

Misol uchun, kompleks tarixiy tailinglarda qolgan oltinni o'rganishda ko'plab hollarda oddiy sianid eritish yordamida faqat 14 % dan 61 % gacha miqdormi olinishi mumkinligi aniqlangan. Bu holatda, qolgan oltin mikron yoki nano darajasida bo'lishi, qo'shma minerallar bilan integrallashganligi sababli oddiy kimyoviy eritish yetarli bo'lmaydi.

Tailinglar ichidagi oltin ko'pincha quyidagi holatlarda bo'ladi:

- Mikron-partikulalar, qattiq mineral to'siqlar orasida
- Sulfid minerallarga bog'langan (masalan, arsenopirit, pirrotin)
- Karbon yoki organik qismi bilan ingibitor (aktivat karbona)
- Silikat yoki oksid matritsada "embedding" bo'lishi

Shunday ekan, takomillashtirish strategiyalari aynan bu holatlarga mos — minerallarni bo'shatish, selektiv eritish va adsorbsiya usullarini takomillashtirish yo'llariga yo'naltiriladi.

2. Pre-treatment (oldindan ishlov berish) usullari

Oldindan ishlov berish — qolgan oltinni bo'shatish va uni eruvchan holga keltirish uchun muhim bosqichdir. Quyida bir nechta samarali pre-treatment yo'llari ko'rib chiqiladi:

a) Fluorid-ortiqcha kimyoviy muolajalar

Misol uchun, NH_4HF_2 yordamida tailinglarni oldindan muolajalash usuli oltin eritish samaradorligini 48,45 % ga oshirgani ma'lum qilingan. Fluor ionlar va vodorod ionlar sinergik ta'siri kristalli strukturani o'zgartirib, oltinni eruvchan holga keltirishga yordam beradi. Bu usul ayniqsa silikat va oksid minerallar bo'lgan joylarda foydali bo'lishi mumkin.

b) Oksidlovchi termal muolajalar (roasting)

Xususan, karbonli (karbonat yoki organik moddalarga boy) rudalarda ikki bosqichli oksidatsion roasting usuli qo'llanilgan. Dastlab kam kislorodli muhitda qisman oksidlash, keyin asosiy bosqich — yanada yuqori oksidlovchi sharoitda bajariladi. Bu usul karbon komponentni qisqartiradi va minerallar ichida yoriqlar, poralar paydo bo'lishiga olib keladi. Tadqiqotda oltin eruvchanligi 4,55 % dan 86,10 % gacha oshgani aniqlangan.

Shuningdek, autoklav leaching jarayonida gipz (gypsum) ta'siri ostida hosil bo'ladigan sekundar fazalar oltin selektivligini pasaytirishi mumkin — bu omil ham e'tibordan chetda qolmasligi kerak.

c) Termal zarralar boyitish (thermal beneficiation)

Termal boyitish metodlari (masalan, yuqori haroratda qizdirish va differentsial erish) yordamida minerallar va sulfid materiallarning qatlamlarini ajratib olish mumkin. Bunday usullar bilan keyingi flotatsiya bosqichiga tayyor material olinadi. Misol uchun, oltinli sulfidlarga egalik qiluvchi materiallarda markaziy flotatsiya (centrifugal flotation) usuli ishlab chiqilgan bo'lib, u yuqori separatsiya samaradorligini ko'rsatmoqda.

3. Ajratish va eritish (leaching) usullari

Pre-treatment bosqichidan so'ng, qolgan oltinni eritish bosqichi boshlanadi. Bu bosqichda turli usullar qo'llaniladi:

a) Siyanid eritish (cyanidation)

Eng keng qo'llaniladigan usullardan biri — sianid asosida leaching. Biroq, sifatli tailinglarda oddiy sianid eritish yetarli bo'lmasligi mumkin. Shuning uchun optimallashtirilgan sianid konsentratsiyasi, kislorot bilan qitma ta'minlash, reagentlar qo'shilishi (masalan, oksidlovchi agentlar) va kontakt vaqti optimallashtiriladi.

b) Ksenat, tiotsiyanat, xlorid va boshqa alternativ eritish reagentlari

Ekologik jihatdan kam zararli reagentlar ustida tadqiqatlar olib borilmoqda. Masalan, "A systematic review of sustainable gold extraction from raw ores using alternative leaching reagents" maqolasida sianid alternativlari (tiotsiyanat, halidlar va boshqalar) ko'rib chiqilgan.

c) Bio-hidrometallurgiya (mikrob oksidlanish + leaching)

Bu yo'l ayniqsa sulfid minerallar bilan bog'langan oltinni ajratishda foydali. Mikroorganizmlar (masalan, Acidithiobacillus yoki boshqa reledoks bakteriyalari) sulfid matrisani oksidlashi, oltin atomlarini bo'shatishi mumkin. Keyin kimyoviy leaching bosqichi bilan birlashgan approach qo'llanadi.

d) Elektrokimyoviy leaching va elektrode pozitsion yig'ish

Elektr toki yordamida oltin ionlarini elektrod yuzasiga tortish usullari ham izlanmoqda. Masalan, LUT universiteti loyihasida 3D bosma komponentlar bilan tuzilgan elektrokimyoviy reaktorlar oltin tiklash uchun tajriba qilingan.

4. Adsorbsiya, selektiv ligantlar va membrandan foydalanish

Kimyoviy eritishdan so'ng hosil bo'lgan Au(III) ionlarini separatsiya qilish uchun adsorbsiya — muhim bosqichdir. Bu bosqichda turli ligandlar, selektiv adsorbentlar va membrandan foydalaniladi:

- Reduksiya qilingan grafen oksidi (rGO) materiallari oltin ionlarini yuqori selektivlik bilan adsorblashi va reduksiya qilishi mumkinligi o'rganilgan. rGO 1,850 mg/g qadar qarshi yuqori qabul qilish qobiliyatiga ega ekanligi ko'rsatilgan.
- Ion-exchange resinlar, xilma-xil ligandlar (tiol-ligandlar, tio-siyanat ligandlar va boshqalar), adsorbent metall sulfid nanopartikullari va bioadsorbentlar ham keng qo'llaniladi.
- Membran filtratsiyasi yordamida Au(III) ionlarini elektroliz bo'yicha konsentratsiyalash va yuqori saflikda qayta tiklash usullari ham tadqiq qilinmoqda.

5. Jarayon integratsiyasi va optimallashtirish

Effektiv va iqtisodiy treningga ega bo'lgan jarayonlar oddiy bosqichlardan iborat bo'lishi shart emas — ularning kombinatsiyasi va optimallashtirilgan sxemalar orqali samaradorlik oshiriladi:

- Pre-treatment + bio-oksidlanish + leaching + adsorbsiya bosqichlarining moslashuvi
- Reagent tejash va chiqindilarni qayta ishlatish (reagentlarni regenerator qilish)
- Motor va energiya samaradorligini oshirish, isitish va sovutish tizimlarini optimallashtirish
- Jarayon nazorati va avtomatizatsiya: real vaqtda pH, oksidlovchi potentsial, oqim tezligi, odatdagi reagent dozasi parametrlarini doimiy monitoring qilish
- Reaktor geometriyasi va fluktuatsiya usullarini optimallashtirish
- Energiyani zamonaviy manbalar bilan ta'minlash (masalan, quyosh energiyasi, issiqlik qayta tiklash)

6. Ilmiy qarashlar va tajriba dalillari

Bir necha zamonaviy tadqiqotlar yuqoridagi yo'nalishlar bo'yicha muhim natijalar beradi:

- Oltin qoldiqlaridan "Recovery of gold from secondary resources — a review" maqolasida pyrometallurgiya, hidrometallurgiya, biohydrometallurgiya usullari va ularning afzalliklari-kamchiliklari ko'rib chiqilgan.
- "Accelerating gold extraction from refractory gold tailings via NH_4HF_2 pre-treatment" tadqiqotida fluorid ionlar yordamida pre-treatment qo'llanilib, leaching samaradorligi sezilarli darajada oshirilgani aniqlangan.
- "Strengthening Gold Extraction from Carbonaceous Gold Ore Based on Decarburization by Two-Stage Fluidized Oxidation Roasting" maqolasida ikki bosqichli oksidatsion roasting natijasida oltin eruvchanligi sezilarli oshgani ko'rsatilgan.
- "The Gypsum Influence on the Formation of Secondary Phases During Autoclave Leaching" tadqiqotida gipz (gypsum) ta'siri ostida hosil bo'ladigan fazalar va ularning leachingga ta'siri tahlil qilingan.
- "Recovery of gold from secondary resources by novel electrochemical reactors realized with additive manufacturing" loyihasida 3D bosib chiqarilgan elektrokimyoviy reaktorlar yordamida elektrokimyoviy oltin tiklash usullari o'rganilmoqda.
- "Thermal Enrichment of Gold-Bearing Sulfide Mineral Material Using Centrifugal Flotation" maqolasida markaziy flotatsiya usuli orqali oltinli sulfidlarga nisbatan samarali boyitish ko'rsatilgan. Yuqoridagi dalillar asosida, ilmiy jihatdan asoslangan takliflar quyidagicha bo'lishi mumkin:
- Har bir ikkilamchi oltin materiali uchun individual mineraloji tahlil va diagnostik eritish testlari o'tkazilishi, chunki universal usul mavjud emas.
- Pre-treatment bosqichi degazifikatsiya, oksidlovchi agentlar va aggressive muolajalar kombinatsiyasini kapsulatsiyalash.
- Bio-oksidlanish va kimyoviy leaching ni integratsiyalash, ya'ni mikroorganizmlar tomonidan matrisani ochish + keyingi kimyoviy eritish.
- Elektro-kimyoviy yig'ish va elektrod reaktor geometriyalarini optimallashtirish — mayda kanalli, yuqori yuzali elektrodlar qo'llash.

- Adsorbentlarni selektivligiga e'tibor — grafen asosli, nanopartikulli adsorbentlar va ligandlarni sintez qilish.

- Jarayon avtomatizatsiyasi va monitoring integratsiyasi — real vaqtda optimallashtirish imkoniyati bilan.

- Reagentlarni qayta tiklash va chiqindilarni zararsizlantirish strategiyalari, ya'ni kaplamali sarf materiallari va qayta ishlatish yo'llari.

Shu tarzda, ikkilamchi oltin ishlab chiqarishda har bir bosqichni takomillashtirish va ularni integratsiyalash orqali butun jarayonning samaradorligini sezilarli darajada oshirish mumkin.

Xulosa

Ushbu maqolada ikkilamchi oltin manbalaridan (teling, minerallarda qolgan izlar, elektron chiqindilar) samarali oltin chiqarishni takomillashtirish bo'yicha ilmiy-texnologik tamoyillar tahlil qilindi. Kirish bo'limida ikkilamchi oltin manbalarining ahamiyati, kamchiliklari va tadqiqot yo'nalishlari muhokama qilindi. Asosiy qismda quyidagilar yoritildi:

- Ikkilamchi oltin manbalarining mineralogik xususiyatlari va ular bilan bog'liq muammolar,

- Pre-treatment usullari (fluorid muolajalar, oksidatsion roasting, termal boyitish) va ularning rolini oshirish yo'llari,

- Eritish (leaching) usullari — sianid, alternativ reagentlar, bio-oksidlanish, elektrokimyoviy leaching,

- Adsorbsiya va selektiv ligandlar yordamida oltinni qayta tiklash,

- Jarayon integratsiyasi, avtomatizatsiya va nazorat qobiliyatini oshirish yo'llari,

- Ilmiy tajriba va qarashlar asosida takliflar.

Natijada, ikkilamchi oltin ishlab chiqarishni takomillashtirish uchun quyidagi tavsiyalar beriladi:

1. Har bir material uchun individual mineraloji va diagnostik testlar qilish;

2. Pre-treatment bosqichlarini turli usullar kombinatsiyasida qo'llash;

3. Bio-oksidlanish va kimyoviy eritish usullarini uyg'unlashtirish;

4. Elektro-kimyoviy yig'ish va reaktor geometriyalarini optimallashtirish;

5. Seleksiyaga yo'naltirilgan adsorbentlar va ligandlarni sintez qilish;

6. Jarayon monitoringi va avtomatizatsiyasini tatbiq etish;

7. Reagentlarni qayta ishlatish va chiqindilarni zararsizlantirishni e'tiborga olish.

Kelajakda, yuqoridagi takliflar amaliy sanoat sharoitida sinovdan o'tkazilishi, o'rta va katta miqyosda pilot loyihalar tashkil etilishi zarur. Shuningdek, iqtisodiy va atrof-muhit jihatlar bo'yicha integratsiyalangan baholashlar (masalan, Life Cycle Assessment) ham olib borilishi maqbul bo'ladi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. Syed S. "Recovery of gold from secondary sources — A review." *Hydrometallurgy*, Vol. 115–116, 2012.

2. "Recovery of gold from secondary resources by novel electrochemical reactors realized with additive manufacturing." LUT University project. "Accelerating

gold extraction from refractory gold tailings via NH_4HF_2 pre-treatment.” *Journal of Molecular Liquids*.

3. Xiao H., Jin J., He F., Han Y., Sun Y. “Strengthening Gold Extraction from Carbonaceous Gold Ore Based on Decarburization by Two-Stage Fluidized Oxidation Roasting.” *Minerals*, 2022.

4. Karimov K., Rogozhnikov D., Fomenko I., Zavalyuev A., Tretiak M., Dizer O. “The Gypsum Influence on the Formation of Secondary Phases During Autoclave Leaching of Gold-Bearing Concentrates and the Silver Recovery Using Cyanidation.” *Materials*, 2024.

5. “Thermal Enrichment of Gold-Bearing Sulfide Mineral Material Using Centrifugal Flotation.” *Refractories and Industrial Ceramics*, 2024.

6. Li F., Zhu J., Sun P., Zhang M., Li Z., Xu D., Gong X., Zou X., Su Y. “Highly Efficient and Selective Extraction of Gold by Reduced Graphene Oxide.” arXiv preprint.

7. “A systematic review of sustainable gold extraction from raw ores using alternative leaching reagents.” *Extractive Industries and Society*, 2022.

8. “Gold Recovery from Smelting Copper Sulfide Concentrate.” *Processes*, MDPI.

9. “Why Investing in Automation Improves Gold Refining Output.” (web article).