



IKKILAMCHI OLTIN ISHLAB CHIQRISHNI TAKOMILLASHTIRISH YO‘LLARI

Marat O‘rinboyev Jasur o‘g‘li

Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika universiteti

Metallurgiya

+998935444748

Annotatsiya: Ushbu tezisda ikkilamchi oltin manbalaridan – rudalardan keyingi qoldiqlar (tailing), texnogen chiqindilar va elektron chiqindilar – dan oltinni samarali tiklash bo‘yicha ilg‘or ilmiy-texnologik yondashuvlar tahlil qilinadi. Asosiy e‘tibor pre-treatment, bio-gidrometallurgik, elektro-kimyoviy va selektiv adsorbsiyaga asoslangan usullarni integratsiyalash orqali oltin ajratish samaradorligini oshirishga qaratilgan. Taklif etilgan yondashuvlar ekologik xavfsizlik, iqtisodiy samaradorlik va resurs barqarorligini ta‘minlashga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: Ikkilamchi oltin, tailing, bio-hidrometallurgiya, elektrokimyo, pre-treatment, chiqindilarni qayta ishlash

Kirish

Metall sanoati, xususan oltin (Au) qazib chiqarish va undan foydalanish, global iqtisodiyot, texnologiya va madaniyat uchun muhim ahamiyat kasb etadi. Oltin nafaqat zargarlik va investitsiya jihatidan, balki elektronika, tibbiyot va sanoat katalizatorlarida ham keng qo‘llanadi. So‘nggi yillarda yangi oltin konlarining kamayishi, qazib olish xarajatlarining oshishi, va ekologik talablarning keskin kuchayishi natijasida, oltin resurslarini samarali boshqarish, chiqindi va ikkilamchi zaxiralardan foydalanish dolzarb muammo bo‘lib qolmoqda.

Ikkilamchi oltin manbalari (secondary gold sources) deganda tushuniladi: (1) rudalarni boyitishdan keyin qolgan tailinglar va chiqindilar; (2) metallurgik jarayonlarda paydo bo‘lgan chiqindi materiallar; (3) elektron chiqindilar (WEEE — Waste Electrical and Electronic Equipment) kabi texnologik chiqindilar; (4) tarixiy yoki arxivdagi tailing omborlari, zaxiralar. Ushbu manbalar, odatda, oltin miqdori jihatdan kamroq bo‘lishi mumkin, lekin “iz miqdori” yoki mikro-/nano-tanelarda bo‘lishi, rudalar va minerallar matritsasiga zich bog‘lanishi, oksidlangan yoki sulfid minerallar bilan kombinatsiyalashuvi kabi xususiyatlar tufayli oddiy usullar bilan olish qiyin bo‘ladi.

Aniq mineraloji va kimyoviy xususiyatlarni bilmasdan amalga oshirilgan oddiy sianid eritish yoki oddiy fizik ajratish usullari ko‘pincha oltinning katta qismini yo‘qotadi. Masalan, “Characterization of Gold in Complex Historical Refractory Tailings...” tadqiqotida Witwatersrand tailinglarida sianid eritish orqali faqat ~14-61 % gacha oltin olinishi mumkinligicha topilgan. Bu darajada past ko‘rsatkichlar, iz yoki mikron-nano darajadagi oltinning engil minerallar (slimes) ichida yoki silikat/sulfid matritsalariga bog‘langan holatda bo‘lishi bilan izohlanadi.

Shu bilan birga, ikkilamchi oltin qayta tiklash ekologik, iqtisodiy va resurs jihatdan bir necha foydali tomonlarga ega:

- **Resurs samaradorligi:** yangi oltin rudalarini qazib olish cheklangan, qazib olish xarajatlari yuqori. Ikkilamchi manbalardan foydalanish — mavjud zaxiralarni yaxshiroq ishlatish demak.
- **Atrof-muhitga zarar kamayishi:** chiqindi omborlaridan chiqayotgan toksik moddalar, eritma oqimlari, erozyon va biologik xilma-xillikka ta'sir — ularni kamaytirish mumkin.
- **Energiya va xarajatlilar:** yangi kon qazib olish, transport, ekspluatatsiya, qazib olinayotgan rudani qayta ishlash — ularning barchasi katta energiya va operatsion xarajat talab qiladi. Ayniqsa chuqur konlar yoki murakkab rudalar uchun. Ikkilamchi manbalarni qayta ishlash ko'pincha qisqaroq transport va kamaytirilgan qazib olinishi talab qiladi.
- **Barqarorlik va qonunchilik bosimi:** global miqyosda yashil texnologiyalar, chiqindilarni kamaytirish, resirkulyatsiya va "urban mining" (shahar chiqindilaridan xomashyo olish) g'oyasi keng tarqalmoqda. Xalqaro va milliy standartlar, ekologik sertifikatlar, emisiyalarni kamaytirish talablarining oshishi sanoatni qayta ishlash texnologiyalariga yo'naltirmoqda.

Ammo amaliyotda quyidagi muammolar mavjud:

1. **Mineraloji murakkablik:** Oltin ko'pincha sulfid minerallarga (arsenopyrite, pyrite, pirrotin) yoki silikat minerallar, karbonat va organik moddalar bilan integrallashgan bo'ladi. Bu matritsa oltin ionlarini kimyoviy eritish yoki biologik oksidlanish uchun kirish nuqtalarini cheklaydi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, tailinglarda slaymlar ($<40\ \mu\text{m}$) yoki hafif minerallar fraksiyalari oltinning katta qismini ushlab qoladi.
2. **Refraktor (qiyin eruvchan) ruda va tailinglar:** oksidlangan emas, balki sulfidlarga bog'langan oltin, oksidlovchi muhitga chidamlilik, oksidlovchi bosqichlar talab qiladi. Misol uchun, Witwatersrand tailinglarida foydalanilgan tailinglarning diagnostik leaching testi ko'rsatganidek, "non-cyanide amenable forms" oltinning 4-38 % gacha hissasini tashkil etadi.
3. **Eritish va reagentlar tanlovi:** Sianid (CN-) eng keng tarqalgan leaching agent, ammo toksikligi va chiqindilar yaratishi sababli ekologik xavf tug'diradi. Shuningdek, sianidga chidamli minerallar uchun samarasi past bo'lishi mumkin. Qisman alternativ reagentlar (thiourea, halidlar, tiotsiyanatlar) ishlatilmoqda, lekin ular ham ma'lum cheklovlariga ega.
4. **Qattiq bo'shatish darajasi va zarrachalar o'lchami:** Mikron va nano zarralar, slaymlar, ingibitsiyaga olib keluvchi organik moddalar mavjudligi leaching va oksidlanish jarayonlarini sekinlashtiradi. Ultra maydalash, ultraflotatsiya kabi fizik usullar va oldindan ishlov berish muhim.
5. **Jarayonlar integratsiyasi, narx-foyda tahlili va ekologik xavfsizlik:** Bir qator laboratoriya tadqiqotlari qilishgani bilan, sanoat sharoitida ulash, iqtisodiy jihatdan foydali va ekologik jihatdan maqbul usullar keng tarqalmagan. Jarayonning har bosqichi (pre-treatment, leaching, adsorbsiyalash, ajratish) uchun chiqindilar va yon mahsulotlar ham nazorat qilinishi zarur.

Mavjud ilmiy adabiyotlarda ikkilanmasdan asosiy yo‘llar — pyrometallurgik va gidrometallurgik usullar, bio-gidrometallurgik oksidlanish, alternativ leaching reagentlari, adsorbentlar, elektrokimyoviy qayta tiklash usullari — keng o‘rganilgan. Masalan, Syed (2012) “Recovery of gold from secondary sources — A review” maqolasi pyrometallurgiya, hidrometallurgiya, bio-gidrometallurgik usullar hamda adsorbentlar, ion-almashinuv va bio-sorbentlarni ishlatish bo‘yicha o‘tgan yillarda erishilgan yutuqlarni tahlil qiladi. ([CoLab](#))

Shu asosda, ushbu tezisning maqsadi: ikkilamchi oltin manbalaridan maksimal darajada tiklash samaradorligini oshirish, ekologik xavfsizlikni ta‘minlash va iqtisodiy rentabellik jihatlaridan optimal texnologiyalarni tavsiya qilishdir.

Asosiy qism

Asosiy qismda ikkilanmashtirilgan ilmiy-texnologik strategiyalar, zamonaviy tajriba natijalari va optimallashtirish yo‘llari keltiriladi.

1. Mineraloji diagnostika va oldindan tahlil

Har qanday ikkilamchi oltin manbasini samarali ishlash uchun birinchi va eng muhim bosqich — mineraloji va kimyoviy diagnostika. Bu bosqichda quyidagilar amalga oshiriladi:

- Mineral tarkibi: sulfid minerallar, silikat, oksid moddalar, karbonat, amorf fazalar, organik komponentlar — qaysi minerallar oltin atomlarini “yopib qo‘ygan”ligini aniqlash.
- Zarrachalar o‘lchami va liberatsiya darajasi: mikron, nano zarralar mavjudligi, slaymlar ($<40\ \mu\text{m}$) va ingichka fraksiyalar. Witwatersrand tailinglari misolida, slaymlar fraksiyasi oltinning katta qismini o‘zida saqlab qoladi.
- Eshituvchan reagentga chidamlilik: oltin sianid eritish, oksidlovchi bosqichlar va bio-oksidlanishga imkon beruvchi elementlar, ingibitor moddalar (masalan, karbon, organik moddalar, arsenik) mavjudligi.
- Diagnostik leaching testlari: reagentlar bilan qism-qism muolaja qilish, kimyoviy eritish (turli reagentlarda), bio-leaching testlari orqali qay qismlar eriydigan, qay qismlar refraktor ekanligini aniqlash.

- Fizik tahlillar: SEM, TEM, XRD, ICP-MS, XRF, FTIR kabi metodlar minerallar strukturasi, kimyoviy holati va mikroelementlar bo‘yicha ma‘lumot beradi.

Mazkur diagnostika natijalari asosida quyidagi takomillashtirish strategiyalari ishlab chiqilishi mumkin.

2. Pre-treatment usullari

Pre-treatment (oldindan ishlov berish) — mineraloji diagnostikadan keyin amalga oshiriladigan muhim bosqich bo‘lib, u oltinni eruvchan holga keltirishga tayyorlaydi. Remarklar asosida quyidagi usullar samarador deb topilgan:

- **Ultra mayda maydalash (ultrafine grinding):** Zarracha o‘lchamini kichraytirish orqali oltin teshiklaridan yoki minerallar matritsasidan yaqinlik oshadi. Masalan, tailinglarda submikrometr va mikrometr darajasidagi oltin bo‘laklari aralashgan bo‘lgan omillarda ultra mayda maydalash oksidlovchi yoki eritish bosqichlarining samaradorligini oshiradi.

- **Termal muolajalar:** Rosting (oksidatsion roasting), autoklavli oksidlovchi jarayonlar (pressure oxidation) kabi usullar sulfid minerallarni oksidlab, organik

komponentlarni yo'qotish, karbon va organik moddalar ta'sirini kamaytirish. Bu jarayonlar ruda ichidagi oltin ionlari eriydigan holga kelishini ta'minlaydi.

- **Kimyoviy pretreatment:** Alkalın, kislotalı yoki halid/tiosiyanat muhitlarda kimyoviy moddalar yordamida minerallar matritsasini ochish, silikat yoki oksid bo'laklarini eruvchan holga keltirish. Ba'zi tadqiqotlarda alkalın (NaOH) pretreatment, microwave roasting (mikroto'vush yordamida roasting), kislorot bilan muolajalar qo'llangan. Masalan, "Evaluation of pre-treatment methods for gold recovery from refractory calcine tailings" tadqiqotida silikat va temir oksid fazalari eng ko'p bo'lgan tailinglar natijasida oddiy sianid eritish bilan oltin tushumi ~17,3 % bo'lgan, lekin ultra mayda maydalash va alkalın pretreatment, mikroto'vush yordamida roasting bilan eroziya oshirilishi mumkinligi ko'rsatilgan.

3. Eritish (leaching) va alternativ reagentlar

Pre-treatment dan keyin oltinni eruvchan holga keltirish uchun eritish jarayoni markaziy rol o'ynaydi. Quydagi bosqichlar va reagentlar muhokama qilinadi:

- **Sianid leaching (cyanidation):** an'anaviy, keng tarqalgan usul. Biroq, yuqori pH, kislorot ta'minoti, kontakt vaqti, erituvchi modda (oksidlovchi) qo'shilishi kabi parametrlarga katta bog'liqlik mavjud. Tasteki, diagnostik leachinglar ko'rsatadi, ba'zi tailinglarda sianid-amenable oltin fraksiyasi past bo'ladi, shuning uchun yuqori samaradorlikka erishish qiyin.

- **Alternativ reagentlar:**

- Thiourea, halid-lar (xlor, brom), tiotsiyanatlar kabi reagentlar ekologik xavfsizroq va ba'zan eritish tezligi yuqori. IntechOpen'dagi "Gold Recovery Process from Primary and Secondary Resources Using Bioadsorbents" bobida elektron chiqindilar (e-waste) dan gold(III) ionlarini thiourea va boshqa alternativ erituvchilar bilan olish bo'yicha tajribalar keltirilgan.

- "A Review on Alternative Gold Recovery Reagents to Cyanide" maqolasida sianidga alternativ reagentlar, ularning afzalliklari-kamchiliklari tahlil qilingan.

- **Bio-hidrometallurgiya va bio-cyanidation:** Mikroorganizmlar yordamida yoki mikroorganizmlar tomonidan hosil qilingan bio-sianid orqali oltinni leaching qilish. "A review of biocyanidation as a sustainable route..." maqolasida biocyanidation usuli past oltin konsentratsiyali rudalar va chiqindilar uchun ekologik jihatdan maqbul ekanligi ta'kidlangan.

4. Adsorbsiya, ajratish va elektrokimyoviy qayta tiklash

Eritish eritmasida oltin ionlari hosil bo'ladi, keyin ularni selektiv ravishda ajratib olish, tiklash zarur:

- **Adsorbent materiallar:**

- Reduksiya qilingan grafen oksidi (rGO): yuqori sirt maydoni, oltin ionlarini adsorbsiyalash + oksidlash/yuqorida reduksiya qilish imkoniyati bilan. "Highly Efficient and Selective Extraction of Gold by Reduced Graphene Oxide" maqolasida rGO ning oltin ionlarini iz darajasidan (1 ppm, 10 ppm) olish bo'yicha 1,850 mg/g gacha bo'lgan adsorbsion sig'imi ko'rsatilgan.

- Bioadsorbentlar: biomassa chiqindilari, organik moddalar, mikroalgalar, polissaxaritlar, persimmon tannin kabi moddalar; ular oltin(III) Ionlarini selektiv

ravishda adsorbsiyalashi va ba'zan reduksiya orqali elementar oltin hosil qilishi mumkin.

- **Ion-almashinuv resinlar va qattiq sorbentlar:** Ular oltin ionlarini eritmadan tortib olishda ishlatiladi, lekin selektivlik va chidamlilik muammolari mavjud.

- **Elektrokimyoviy usullar va elektrod yig'ish:**

- Elektrod yuzalariga oltin ionlarini tozalash yoki metall holatda yigilishi
- Novel elektrokimyoviy reaktorlar, yuqori sirt maydoni, kompleks geometriyalı elektrodlar, 3D bosma komponentlar yordamida qurilgan modifikatsiyalangan reaktorlar. Masalan, LUT universiteti loyihasida ikkilamchi manbalardan oltin olishda bunday elektrokimyoviy texnologiyalar ishlanmoqda.

5. Integratsiyalashgan jarayon sxemalari va optimallashtirish

Texnologiyalarni individual bosqichlaricha ishlatishdan ko'ra, ularni integratsiyalashgan, ketma-ket va optimallashtirilgan sxemalar foydali:

- Pre-treatment + bio-leaching + alternativ eritish + adsorbsiya/elektro-kimiya: bu ketma-ketlik yuqori chiqim va selektivlik, chiqindilarni kamaytirishni ta'minlashi mumkin.

- Reagentlarning qayta ishlatilishi: eritish suyuqliklari, adsorbentlar, elektrod yuzalari regeneratsiya qilinishi lozim.

- Energiya tejovchi texnologiyalar: mikroto'ldin roasting, issiqlik qayta tiklash, shamollatish, avtoklav bosqichlarida energiya samaradorligi.

- Real vaqtli monitoring va avtomatizatsiya: pH, oksidlovchi potentsial, zarracha o'lchami, kontakt vaqti, reagent konsentratsiyasi kabi parametrlarning doimiy nazorati.

- Iqtisodiy-texnik baholash: har bir jarayon bosqichi uchun apparat investitsiyasi, ishlov berish xarajatlari, chiqindilarni tozalash va chiqindi boshqaruvi nuqtai nazaridan narx-foyda tahlili. Misol uchun, Witwatersrand tailinglari tahlilida 60 % dan yuqori oltin tiklashi uchun oldindan pretreatment + moslashtirilgan eritish talab qilinadi.

6. Amaliy tajriba misollari

- "Characterization of Gold in Complex Historical Refractory Tailings..." tadqiqoti: Witwatersrand tailinglarida turli operatsion minerallar fraksiyalari, slaymlar va yengil minerallar ichida oltinni diagnostik leaching orqali aniqlagan, va oddiy sianid eritishning samarasi 50 % dan past bo'lgan holatlar topilgan.

- "Evaluation of pre-treatment methods for gold recovery from refractory calcine tailings" ishi: silikat va temir oksid fazalari ko'p bo'lgan tailinglar ustida ultra miya maydalash, alkalın pretreatment va mikroto'ldin (microwave) yordamida retro-optimizatsiya qilib, oltin tushimini sezilarli oshirish mumkinligi ko'rsatilgan.

- LUT universiteti loyihasi: elektrokimyoviy reaktorlarni 3D bosma texnologiya va yuqori sirt maydonli elektrodlar yordamida ishlash, tok samaradorligini oshirish vujudga keltirilmoqda.

- rGO bilan tajribalar: elektron chiqindilar va eritma suyuqliklaridan oltin ionlarini yuqori selektivlik bilan ajratish; 1,850 mg/g ga yaqin adsorbsion sig'ımlar; 14 ta birga mavjud elementlar bo'lsa ham selektivlik saqlangani keltirilgan.

Xulosa

Ikkilamchi oltin ishlab chiqarish — bu faqat chiqindilardan daromad olish yo‘li emas, balki resurslardan oqilona foydalanish, ekologik xavfsizlikni ta‘minlash va sanoat barqarorligini oshirishning asosiy vositasidir. Tailinglar, elektron chiqindilar, texnogen omborlar va arxiv boyitmalar tarkibida iz miqdorda bo‘lsa-da, sezilarli oltin zaxiralari mavjud bo‘lib, ularni zamonaviy texnologiyalar yordamida qayta ishlash muhim strategik yo‘nalish sanaladi.

Tahlil va tajriba asosida aniqlanishicha, samarali oltin qayta tiklash uchun quyidagilar zarur:

- **Mineraloji asoslangan yondashuv:** rudadagi oltinning holati, bog‘langan minerallar, zarracha o‘lchami va ularning strukturasi chuqur o‘rganmasdan samarali ishlab chiqarish mumkin emas.

- **Oldindan ishlov (pre-treatment):** ultra maydalash, oksidlovchi roasting, kimyoviy/kislota muolajalari orqali oltinni eruvchan holga keltirish samaradorlikni sezilarli oshiradi.

- **Innovatsion eritish usullari:** an‘anaviy sianidga alternativ bioleaching, halidlar yoki thiourea asosli eritmalar ekologik va texnologik jihatdan afzallik beradi.

- **Selektiv ajratish va adsorbsiyalash:** yuqori samaradorlikka ega rGO, bioadsorbentlar va yangi turdagi qatronlar oltin ionlarini iz miqdorida ham ajratib olish imkonini beradi.

- **Jarayonlarni integratsiyalash:** har bir texnologiyani bosqichma-bosqich emas, balki o‘zaro bog‘liq kompleks tarzda olib borish kerak. Bunda avtomatlashtirish va real vaqt monitoring tizimlari zarur.

Ushbu tizimli yondashuvlar oltin ishlab chiqarishning ikkilamchi manbalarini faollashtirish, chiqindilarni minimal darajagacha kamaytirish, energiya samaradorligini oshirish va ekologik xavfni pasaytirishga xizmat qiladi.

Takliflar

1. **Respublika miqyosida** ishlatilmayotgan tailinglar va arxiv boyitma omborlarining mineraloji-ximiyaviy pasporti (tahlil) tuzilsin.

2. **Ilmiy-tadqiqot institutlari** va sanoat korxonalari hamkorligida sinov laboratoriyalari tashkil etilib, bio-gidrometallurgik va elektrokimyoviy ishlov berish texnologiyalari bo‘yicha tajriba liniyalari ishlab chiqilsin.

3. Oliy ta‘lim muassasalarida **urban mining**, chiqindilarni qayta ishlash, bio-leaching texnologiyalari bo‘yicha maxsus kurslar tashkil etilsin.

4. Mahalliy sanoat korxonalarida mavjud texnogen omborlarni baholab, **iqtisodiy tahlil asosida** rentabellik ko‘rsatkichlari hisoblab chiqilsin.

5. **Yashil texnologiyalarni rivojlantirishga sarmoya** jalb qilish uchun xalqaro grantlar, qo‘shma loyihalar va startaplar platformasi yaratilishi taklif etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Syed, S. (2012). *Recovery of gold from secondary sources—A review*. Hydrometallurgy, 115–116, 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>

2. Tadesse, B. et al. (2023). *Characterization of Gold in Complex Historical Refractory Tailings from the Witwatersrand Basin*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08827508.2023.2298728>

3. Rhee, I. et al. (2022). *Highly Efficient and Selective Extraction of Gold by Reduced Graphene Oxide*. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2208.01435>
4. IntechOpen (2019). *Gold Recovery Process from Primary and Secondary Resources Using Bioadsorbents*. <https://www.intechopen.com/chapters/66110>
5. Shams, K. (2016). *A Review on Alternative Gold Recovery Reagents to Cyanide*. Modern Environmental Science and Engineering, 2(8), 417–429. https://file.scirp.org/pdf/MSCE_2016081816514902.pdf
6. SAIMM Journal (2022). *Evaluation of pre-treatment methods for gold recovery from refractory calcine tailings*. <https://www.saimm.co.za/Journal/v122n10p561.pdf>
7. LUT University (2023). *Recovery of gold from secondary resources using novel electrochemical reactors*. <https://www.lut.fi/en/projects/recovery-gold-secondary-resources-novel-electrochemical-reactors-realized-additive>
8. Vieira, M. G. A. et al. (2014). *Recovery of gold using bioadsorbents: a sustainable alternative*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2(1), 230–237.