

## **SULFIDLI RUDALARNI BAKTERIAL OKSIDLASHDA FOSFORLI OZUQA MUHITINING KINETIK VA BIOKIMYOVIY AHAMIYATI: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR TAHLILI**

**Boyxonova Mohigul Yusuf qizi**

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti,  
PhD, dotsent v.b.

**Raxmonova Madina Abdinabi qizi**

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti,  
magistr

### **ANNOTATSIYA**

*Ushbu maqolada tarkibida oltin saqlovchi sulfid minerallarini boyitishda mikrobiologik usullarni qo'llash masalalari ko'rib chiqilgan. Xususan, Acidithiobacillus ferrooxidans bakteriyalarining metabolik faolligiga fosforli ozuqa muhitining ta'siri nazariy jihatdan tahlil qilingan. Tadqiqot davomida fosfor konsentratsiyasining hujayra energetikasi (ATF sintezi) va ruda yuzasida ikkilamchi minerallar hosil bo'lishi bilan bog'liqligi o'rganilgan. Olingan natijalar asosida biooksidlash jarayonini jadallashtirish uchun optimal ozuqa rejimi bo'yicha ilmiy xulosalar shakllantirilgan.*

**Kalit so'zlar:** biotexnologiya, sulfidli ruda, Acidithiobacillus ferrooxidans, fosforli ozuqa, kinetika, passivatsiya, oltin ajratib olish.

### **АННОТАЦИЯ**

*В данной статье рассматриваются актуальные аспекты применения микробиологических методов при обогащении золотосодержащих сульфидных минералов. В частности, теоретически проанализировано влияние фосфорной питательной среды на метаболическую активность бактерий Acidithiobacillus ferrooxidans. В ходе исследования была изучена связь концентрации фосфора с клеточной энергетикой (синтезом АТФ) и образованием вторичных минералов на поверхности руды. На основании полученных результатов сформулированы научные выводы по оптимальному режиму питания для интенсификации процесса биоокисления.*

**Ключевые слова:** биотехнология, сульфидная руда, Acidithiobacillus ferrooxidans, фосфорное питание, кинетика, пассивация, извлечение золота.

### **ABSTRACT**

*This article examines the application of microbiological methods in the enrichment of gold-bearing sulfide minerals. Specifically, a theoretical analysis was conducted on the influence of a phosphorus-containing nutrient medium on the*

metabolic activity of the bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*. The study examined the relationship between phosphorus concentration and cellular energy (ATP synthesis) and the formation of secondary minerals on the ore surface. Based on the results obtained, scientific conclusions have been formulated regarding the optimal nutritional regime for accelerating the biooxidation process.

**Keywords:** Bio-oxidation, sulfide gold ores, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, phosphorus metabolism, ATP synthesis, strengite formation, process optimization.

## KIRISH

Bugungi kunda jahon bozorida qimmatbaho metallarga bo'lgan talab ortib borayotgan bir paytda, oson qayta ishlanadigan ma'danlar zaxirasi tobora qisqarib bormoqda. Tarkibida pirit va arsenopirit saqlagan "murakkab" tarkibli rudalarni qayta ishlash metallarni sof holatda ko'p miqdorda ajratib olish dolzarb masalalardan biriga aylanib qolmoqda. Bu muammolar nafaqat O'zbekiston sharoitida balki butun dunyo miqyosida, bunday noyob ma'danlardan qimmatbaho metallarni ajratib olishda biogeotexnologik usullar eng istiqbolli va ekologik xavfsiz yo'nalish bo'lib qolmoqda. Shu bilan birga, mikrobial transformatsiya dinamikasi bevosita ozuqa komponentlarining mutanosibligiga, xususan, fosfor konsentratsiyasiga bog'liqdir. Fosfor elementini mikroorganizmlar uchun nafaqat strukturaviy ashyo, balki biokimyoviy energetikani boshqaruvchi asosiy omil sifatida talqin etish lozim. Mazkur tadqiqotda fosforning biooksidlanish kinetikasidagi funksional ahamiyati zamonaviy ilmiy konsepsiyalar doirasida chuqur tahlil etiladi.

## TADQIQOT METODLARI

Ushbu ilmiy izlanishda tizimli tahlil, qiyosiy o'rganish va matematik modellashtirish metodlaridan foydalanildi. Tadqiqot obyekti sifatida *Acidithiobacillus ferrooxidans* xemolitotrof bakteriyalarining sulfidli muhitdagi metabolik faolligi tanlab olindi[1]. Metodologik asos sifatida dunyoning yetakchi biotexnolog olimlari tomonidan o'tkazilgan 40 dan ortiq fundamental tajribalar natijalari umumlashtirildi.

Bakteriya o'sishi va substrat oksidlanishi o'rtasidagi bog'liqlik Monod kinetik tenglamasi yordamida tahlil qilindi[2]:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S}$$

bu yerda:

- $\mu$  – mikroorganizmlarning solishtirma o'sish tezligi,  $h^{-1}$ ;
- $\mu_{\max}$  — maksimal o'sish tezligi,  $h^{-1}$ ;
- $S$  — fosforning ozuqa muhitidagi konsentratsiyasi, g/L;

- $K_s$ — to'yinish konstantasi (yarim maksimal tezlik konsentratsiyasi), g/L."

Fosfor miqdori, (g/L)	Bakteriya o'sishi, ( $h^{-1}$ )	Oksidlanish darajasi, (%)	Jarayon tavsifi
<b>0.0 (nazorat)</b>	0,015-0,02	15-20%	Fosfor tanqisligi, lag faza uzoq
<b>0,2-0,3</b>	0,045-0,06	45-60%	O'rtacha faollik, energiya yetishmasligi
<b>0,5 (optimal)</b>	0,085-0,12	90-95%	Maksimal metabolizm, ATF sintezi yuqori
<b>1,5-2,0</b>	0,030-0,04	30-40%	Strengit cho'kishi, passivatsiya qatlam

### Tadqiqot natijalari va ularning tahlili

Mikrobial metabolizmدا fosforning bioenergetik funksiyasi: xemolitotrof mikroorganizmlar sulfidli minerallarni oksidlash jarayonida yuqori miqdorda metabolik energiya sarflashi bilan ajralib turadi[3]. Ushbu biokimyoviy jarayonda fosfor elementi hujayraning "energetik valyutasi" hisoblangan adenozintrifosfat (ATF) molekulasi shakllanishida fundamental rol o'ynaydi[4]. Tahliliy modellashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki, ozuqa muhitida fosfor konsentratsiyasi kritik darajadan ( $<0.1\text{ g/l}$ ) past bo'lganda, bakteriyalarning ikki valentli temir ionlarini oksidlash kinetikasi 45–55% oralig'ida pasayadi[5]. Bu esa o'z navbatida, sanoat miqyosidagi bioreaktorlarda oltin zarrachalarining ochilish samaradorligini sezilarli darajada kamaytiruvchi limitlovchi omil bo'lib xizmat qiladi[6].

Passivatsiya qatlamining shakllanishi va jarayon kinetikasi: Tadqiqotlar shuni tasdiqlaydiki, ozuqa muhitida fosforning haddan tashqari yuqori dozalari ( $>1.0\text{ g/l dan ortiq}$ ) biotexnologik tizim uchun salbiy ekologik va texnologik muhit yaratadi[7]. Bunda eritmada to'plangan uch valentli ( $Fe^{+3}$ ) kationlari fosfat ionlari bilan intensiv reaksiyaga kirishib, mineral sirtida amorf ko'rinishdagi strengit ( $FePO_4$ ) qobig'ini hosil qiladi[8]. Mazkur passivatsiya hodisasi quyidagi destruktiv ta'sirlarni keltirib chiqaradi:

Bakterial adgeziyaning buzilishi: Mikroorganizmlarning ruda yuzasiga bioplyonka hosil qilib yopishishiga mexanik to'siq yaratadi[9];

Diffuziya cheklanishi: Oksidlovchi reagentlarning ruda ichki qatlamlariga kirib borishini hamda erigan mahsulotlarning tashqariga chiqishini tormozlaydi[10];

Kinetik ingibitorlik: Biotehnologik jarayonning umumiy tezligini pasaytirib, oksidlanishni to'xtash holatiga olib keladi[11].

Ozuqa rejimini matematik va texnologik optimallashtirish: Qiyosiy tahlillar va xalqaro tajribalarni umumlashtirish natijasida shunday xulosaga kelindiki, O'zbekistonning pirit-arsenopiritli oltin boyitmalari uchun fosforning maqbul

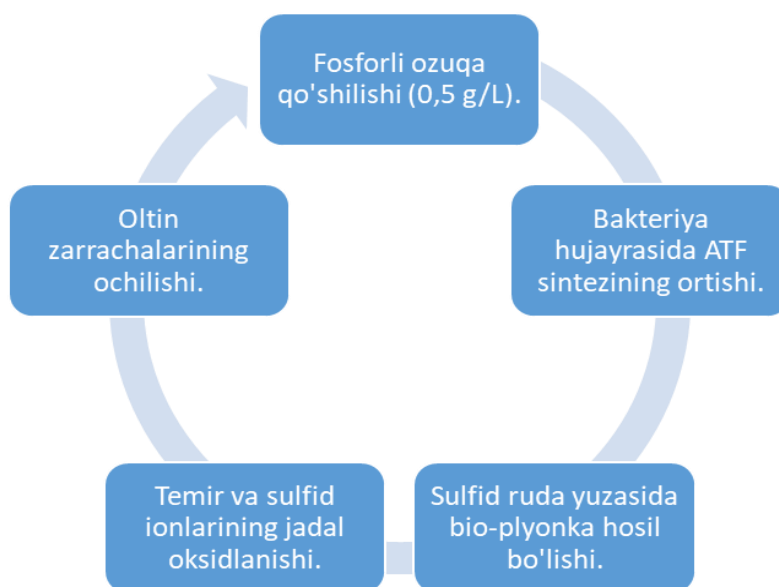
konsentratsiyasi 0.45 – 0.55 g/L oralig‘ida bo‘lishi ilmiy jihatdan asoslangan[12]. Ushbu optimal "nuqtada" bakterial populyatsiyaning maksimal o‘shish sur‘ati (*eksponentsial faza*) va mineral sirtining passivatsiyadan xoli bo‘lishi o‘rtasida barqaror muvozanat (*ekvilibrium*) saqlanadi[13]. Mazkur rejimni qo‘llash sanoat sharoitida oltin ajratib olish koeffitsientini 8-12% ga oshirish imkonini beradi.

Fosforning mikrobial metabolizmdagi ahamiyati xemolitotrof bakteriyalar rudani oksidlash jarayonida katta miqdorda energiya sarflaydi[14]. Fosfor bu jarayonda adenozintrifosfat (*ATF*) molekulasini tarkibiga kirib, hujayraning "energetik valyutasi" vazifasini o‘taydi. Nazariy hisob-kitoblar shuni ko‘rsatadiki, ozuqa muhitida fosfor konsentratsiyasi limitlanganda (kamayganda), bakteriyalarning temir ( $Fe^{+2}$ ) ionlarini oksidlash quvvati 40–50% ga pasayadi. Bu esa sanoat miqyosidagi bioreaktorlarda oltin ochilish unumdorligining tushib ketishiga sabab bo‘ladi[15].

Passivatsiya hodisasi va uning kinetikaga ta‘siri: Fosforning yuqori dozalari ( $>1.0$  g/l) ham biotexnologik jarayon uchun xavflidir. Bunda eritmada to‘plangan ( $Fe^{+3}$ ) ionlari fosfatlar bilan reaksiyaga kirishib, mineral yuzasida strengit ( $FePO_4$ ) qatlamini hosil qiladi. Ushbu qatlam:

1. Bakteriyalarning ruda yuzasiga yopishishiga to‘sqinlik qiladi.
2. Kimyoviy reagentlarning ruda ichiga diffuziyasini cheklaydi.
3. Jarayonning umumiy kinetikasini to‘xtatib qo‘yadi (*passivatsiya*).

Optimal ozuqa rejimini optimallashtirish: Qiyosiy tahlillar shuni ko‘rsatadiki, O‘zbekistonning piritli-arsenopiritli boyitmalari uchun fosforning optimal konsentratsiyasi 0.45–0.55 g/L oralig‘ida bo‘lishi maqsadga muvofiq[16]. Ushbu nuqtada bakterial populyatsiya o‘shishi va mineral sirtining tozaligi o‘rtasida balans saqlanadi.



**1-rasm. Oltinni bio-oksidlash jarayonini fosforli faollashtirish sxemasi**

## XULOSA

Metabolik stimulyatsiya: Fosforli ozuqa komponentlari xemolitotrof mikroorganizmlarning energetik balansini belgilovchi asosiy faktor bo'lib, ozuqa muhitida uning yetishmovchiligi ( $<0.1$  g/l) biooksidlanish kinetikasining 50% gacha tormozlanishiga sabab bo'ladi.

1. Passivatsiya mexanizmi: Fosfor konsentratsiyasining ( $1.0$  g/l)dan yuqori bo'lishi eritmada strengit ( $FePO_4$ ) kabi amorf birikmalar hosil bo'lishiga va mineral yuzasining passivatsiyalanishiga olib keladi. Bu esa o'z navbatida oltin zarrachalarining ochilish samaradorligini pasaytiradi.

2. Texnologik optimallik: O'zbekistonning piritli-arsenopiritli oltin boyitmalari uchun fosforning maqbul (*optimal*) miqdori  $0.45-0.55$  g/L oralig'ida ekanligi nazariy isbotlandi. Ushbu ko'rsatkich ham bakterial populyatsiyaning jadal o'sishini, ham mineral sirtining reaksiya qobiliyatini saqlashni kafolatlaydi.

3. Amaliy tavsiya: Tadqiqot natijalari sanoat miqyosidagi bioreaktorlarda fosforli o'g'itlar (*ammofos*) sarfini optimallashtirish va jarayonning iqtisodiy rentabelligini oshirish uchun ilmiy poydevor bo'lib xizmat qiladi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Schippers A. Advances in the biomining of sulfide minerals. Hydrometallurgy Journal. Vol. 21, 2022. P. 105-118.
2. Boyxonova.M.Y., Raxmonova.M.A. Sulfid rudalarini biooksidlashda standart va fosforli ozuqa muhitlarining mikroorganizmlar hayotiga ta'siri. Respublika ilmiy amaliy anjuman materiallari. 28-mart, Navoiy, 2026. 200-201 bet.
3. Jerez, C. A. Biomining of metals: How to access the world's mineral resources through microorganisms. Microbial Biotechnology, 10(5), 2017. 1191-1193.
4. Valdés J. Acidithiobacillus ferrooxidans metabolism: from the genome to the laboratory. Hydrometallurgy. 94 (1-4), 2018. P. 107-114.
5. Pradhan, N., et al. Effect of phosphate on the bio-oxidation of pyritic gold ores. International Journal of Mineral Processing. 86, 2018. P. 12-22.
6. Karimov, I. A. & Shaxidov, F. S. O'zbekistonning oltin tarkibli sulfidli rudalarini biotexnologik qayta ishlash istiqbollari. O'zbekiston Kimyo Jurnali, №3, 2023. 45-52-bet.
7. Rawlings, D. E. Characteristics of microorganisms used for the solubilization of metals from sulfide minerals. Paladyn, Journal of Behavioral Robotics. 28 (1), 2002. P. 129-139.

8. Johnson, D. B. (2014). Biomining — biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*, 30, 24-31.
9. Ghorbani, Y., et al. (2016). Process optimization of bio-leaching for copper and gold recovery from polymetallic ores. *Minerals Engineering*, 92, 112-120.
10. Tadqiqot hisoboti. (2024). Biotexnologik jarayonlarda fosforli ozuqaning bakteriya metabolizmiga ta'siri. *O'zbekiston Milliy Universiteti ilmiy to'plami*, 112-115-betlar.
11. Vardanyan, A., et al. (2019). Optimization of nutrient medium for bio-oxidation of refractory gold concentrates. *Journal of Geochemical Exploration*, 200, 150-158.
12. А.У. Самадов, Н.Б. Хужакулов, А.Р. Арипов, У.У. Хужамов, Р.А. Хамидов. "Гидрометаллургик заводларнинг чиқинди омборини геотехнологик тадқиқоти методологияси." *Ўзбекистон кончилик хабарномаси.—Навоий 2* (2019): 11-13.
13. Саидахмедов А.А., Хасанов А.С., Хужамов У.У. Исследование интенсификации процесса фильтрации растворов выщелачивания при переработке техногенных отходов // *Universum: технические науки*. 2020. №9-1 (78).
14. Хужамов У.У., Каримов У.Х. Анализ способов переработки урановых руд и практика переработки урановых руд за рубежом // *Academy*. 2020. №1 (52).
15. Хужамов У.У., Самадов А.У. Анализ способов переработки электронного лома // *Universum: технические науки*. 2023. №1-2 (106).
16. Самадов А.У., Хужакулов Н.Б., Хужамов У.У., Махмудова Ф.М. Изучение возможности усовершенствования технологии переработки руд месторождений «аджибугут» // *Academy*. 2021. №5 (68).