



**OLTIN TARKIBLI RUDALARNI SORBSIYALASH JARAYONINI
INTELLEKTUALLASHTIRISH: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR VA
KELAJAK ISTIQBOLLARI**

Kadirov Yorqin Baxodirovich

**Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Avtomatlashtirish va
boshqaruv kafedrası, dotsent**

Amonov Mahmudjon Nodir o'g'li

Navoiy Davlat Konchilik va Texnologiyalar Universiteti, Magistratura talabasi

Annotatsiya

Ushbu maqolada oltin tarkibli rudalarni sorbsiyalash jarayonlarini intellektual avtomatlashtirish sohasidagi so'nggi tadqiqotlar tahlil qilinadi. 79 ta xalqaro ilmiy manba asosida sun'iy intellekt, mashina o'rganish va optimallashtirish usullarining oltin qazib olish sanoatida qo'llanilishi o'rganilgan. Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, sun'iy neyron tarmoqlar yordamida oltin ajratish jarayonini 94–98% aniqlik bilan prognoz qilish mumkin, shuningdek, mashina o'rganish usullari bilan optimallashtirilgan faollashtirilgan ko'mir adsorbenti 64 mg/g adsorbsion sig'imga ega bo'ladi. Maqolada an'anaviy sorbsiyalash jarayonlarining cheklovlari, zamonaviy intellektual usullar, optimallashtirish strategiyalari, amaliy tatbiqlar va kelajakdagi rivojlanish yo'nalishlari batafsil tahlil qilingan.

Kalit so'zlar: oltin rudasi, sorbsiyalash, intellektual avtomatlashtirish, sun'iy neyron tarmoqlar, mashina o'rganish, jarayon optimallashtiruvi, sianidli ishqorlash, ko'mirda adsorpsiya

Аннотация

В данной статье проанализированы современные исследования в области интеллектуальной автоматизации процессов сорбции золотосодержащих руд. На основе 79 международных научных публикаций изучено применение методов искусственного интеллекта, машинного обучения и оптимизации в золотодобывающей промышленности. Результаты анализа показывают, что с помощью искусственных нейронных сетей процесс извлечения золота можно прогнозировать с точностью 94–98%, а оптимизированный метод машинного обучения позволяет достичь адсорбционной ёмкости активированного угля 64 мг/г. В статье подробно рассмотрены ограничения традиционных процессов



сорбции, современные интеллектуальные методы, стратегии оптимизации, практические применения и направления будущего развития.

Ключевые слова: золотая руда, сорбция, интеллектуальная автоматизация, искусственные нейронные сети, машинное обучение, оптимизация процессов, цианидное выщелачивание, адсорбция на угле

Abstract

This paper analyzes recent research on the intellectual automation of gold ore sorption processes. Based on 79 international scientific publications, the application of artificial intelligence, machine learning, and optimization methods in the gold mining industry is examined. The analysis results show that artificial neural networks can predict the gold extraction process with 94–98% accuracy, and machine learning–optimized activated carbon achieves an adsorption capacity of 64 mg/g. The article provides a detailed review of the limitations of traditional sorption processes, modern intelligent methods, optimization strategies, practical applications, and future development directions.

Keywords: gold ore, sorption, intellectual automation, artificial neural networks, machine learning, process optimization, cyanide leaching, carbon adsorption

I. Kirish. Oltin qazib olish sanoati global iqtisodiyotning muhim tarkibiy qismidir, yillik ishlab chiqarish hajmi esa 3000 tonnadan oshadi. Zamonaviy korxonalarda metallurgiya jarayonlarini samaradorligini oshirish, ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirish va ekologik xavfsizlikni ta'minlash asosiy vazifalardan biridir. An'anaviy boshqaruv usullari murakkab, ko'p o'zgaruvchili va nochiziqli xususiyatlarga ega jarayonlarni to'liq nazorat qilishda qiyinchiliklarga duch keladi [1]. Oltin tarkibli rudalarni qayta ishlashning asosiy bosqichlaridan biri — sorbsiyalash. Bu jarayonda sianidli eritmadan oltin ionlari faollashtirilgan ko'mir yuzasida adsorbsiya qilinadi. Jarayon samaradorligi ruda tarkibi, eritma konsentratsiyasi, harorat, pH qiymati, aralashtirish tezligi kabi bir qator omillarga bog'liq. Jarayon dinamikasining murakkabligi, o'lchovdagi shovqinlar va real vaqt rejimida ishonchli ma'lumotlarning yetishmasligi an'anaviy boshqaruv tizimlarining samaradorligini cheklaydi [2, 3].

So'nggi yillarda sun'iy intellekt (SI) va mashina o'rganish (MO) texnologiyalari metallurgiya sanoatida yangi imkoniyatlar yaratdi. Chuqur neyron tarmoqlar, mustahkamlash o'rganish algoritmlari va gibrid modellashtirish usullari murakkab jarayonlarni yuqori aniqlik bilan prognoz qilish va optimal boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqishga imkon beradi [4, 5].

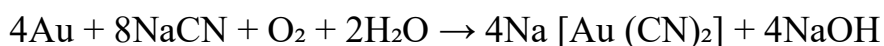


Tadqiqot maqsadi va vazifalari. Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi oltin tarkibli rudalarni sorbsiyalash jarayonini intellektuallashtirish bo'yicha xalqaro tajribani umumlashtirish va zamonaviy yondashuvlarni tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

1. An'anaviy oltin sorbsiyalash jarayonlari va ularning cheklovlarini tahlil qilish
2. Sun'iy intellekt va mashinani o'rganish usullarining qo'llanilishini o'rganish
3. Jarayon optimallashtirish strategiyalari va avtomatlashtirish yondashuvlarini ko'rib chiqish
4. Amaliy tatbiqlar va eksperimental natijalarni baholash
5. Kelajakdagi rivojlanish yo'nalishlarini aniqlash

Tadqiqot metodologiyasi. Izlanishlar 2003-2025 yillar oralig'ida nashr etilgan 79 ta xalqaro ilmiy maqola asosida o'tkazildi. Qidiruv SciSpace, Google Scholar va boshqa ilmiy ma'lumotlar bazalarida amalga oshirildi. Tahlil qilingan maqolalar IEEE Access, Systems, Minerals va boshqa nufuzli xalqaro jurnallarda chop etilgan. Oltin sorbsiyalash jarayonlarining hozirgi holati. An'anaviy texnologiyalar Oltin ajratib olishning asosiy sanoat usullari sianidli ishqorlash va keyingi faollashtirilgan ko'mirda adsorpsiya jarayonlarini o'z ichiga oladi. Ikki asosiy konfiguratsiya qo'llaniladi [1]: Carbon-in-Pulp (CIP)- Ko'mir pulpada: Bu usulda oltin ishqorlanishi va adsorpsiyasi ketma-ket bosqichlarda amalga oshiriladi. Avval ruda sianidli eritma bilan ishqorlanadi, so'ngra eritmada oltin faollashtirilgan ko'mir yordamida ajratib olinadi. Carbon-in-Leach (CIL) - Ko'mir ishqorlashda: Bu jarayonda ishqorlash va adsorpsiya bir vaqtda bitta reaktorda sodir bo'ladi, bu esa jarayon vaqtini qisqartiradi va ba'zi hollarda samaradorlikni oshiradi. Sianidli ishqorlash reaksiyasi quyidagicha ifodalanadi:



Faollashtirilgan ko'mir yuzasida oltin kompleksi adsorpsiya qilinadi va keyinchalik yuqori harorat va bosim ostida desorpsiya qilinadi. Amaliy cheklovlar va muammolar Zamonaviy oltin sorbsiyalash jarayonlari bir qator jiddiy cheklovlarga ega [1, 2, 3]:

1. Jarayon dinamikasining noaniqligi: Sekin o'zgaruvchan xususiyatlar (Slow Time-Varying Features - STVF) yumshoq sensorlar va nazorat tizimlarining ishlashini yomonlashtiradi.
2. Ish sharoitlarining o'zgarishi: Ruda tarkibining o'zgaruvchanligi (Change of Working Condition - COWC) modellarning umumlashtirilishini cheklaydi.
3. O'lchash shovqinlari: Konsentratsiya signallarida katta shovqinlar kinetik baholashni qiyinlashtiradi.



4.Ma'lumotlar etishmasligi: Yuqori sifatli, uzluksiz zavod ma'lumotlarining cheklanganligi dinamik modellarni aniqlashni qiyinlashtiradi.

5.Ekologik va iqtisodiy xarajatlar: Natriy sianidning qoldiq miqdori va atrof-muhitni tozalash xarajatlari yuqori.

6.Reaktorlar kaskadining murakkabligi: Ko'p bosqichli aralashtirilgan reaktorlar tizimini boshqarish kinetik jihatdan murakkab.

Bu cheklovlar an'anaviy PID nazorat tizimlarining samaradorligini pasaytiradi va intellektual yondashuvlarni joriy etishni zarur qiladi.

II. Sun'iy intellekt va mashinani o'rganish usullari. Oltin sorbsiyalash jarayonlarini optimallashtirishda sun'iy intellekt va mashinani o'rganish usullari samarali vosita sifatida qo'llaniladi.

Chuqur neyron tarmoqlar (Long Short-Term Memory, sun'iy neyron tarmoqlari va Radial Basis Function tarmoqlari) murakkab va no-chiziqli jarayonlarni yuqori aniqlik bilan bashorat qiladi. Gibrid Long Short-Term Memory tarmoqlari va mexanistik modellar kinetik parametrlarni optimallashtirib, ishqorlash jarayonini aniq prognoz qilish imkonini beradi [2]. Sun'iy neyron tarmoqlari yordamida oltin ajratish bashorati 94–98 foiz, tiomochevina iste'moli bashorati esa 95–99 foiz aniqlik bilan baholanadi [4]. Radial Basis Function tarmoqlari interval bashoratni ta'minlaydi [6].

Mustahkamlash o'rganish algoritmlari (Reinforcement Learning algoritmlari) oltin sianidli ishqorlash jarayoni uchun optimal boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqishda qo'llaniladi va o'lchash shovqinini kamaytirishga yordam beradi [7].

Qo'llab-quvvatlovchi vektor mashinalari algoritmlari (Support Vector Machine algoritmlari) jarayon xususiyatlaridagi o'zgarishlarni aniqlash, model ishlashini monitoring qilish va adaptiv tuzatishni boshqarish uchun ishlatiladi [3].

Optimallashtirish va adaptiv o'rganish usullari (Zarralar to'dasini optimallashtirish algoritmi, Simulated Annealing, Holatlar asosida o'rganish, O'z vaqtida o'rganish va Asosiy komponentlar tahlili) jarayon parametrlarini moslashuvchan boshqarishga imkon beradi [2, 3].

Kelajakda istiqbolli usullar: noravshan mantiqqa asoslangan nazorat tizimlari, genetik algoritmlar va ekspert tizimlar hali keng qo'llanilmagan bo'lib, tadqiqot bo'shliqlarini ifodalaydi. Sun'iy intellekt va mashinani o'rganish usullari oltin sorbsiyalash jarayonini samarali boshqarish va optimallashtirishda yuqori potensialga ega.

III. Jarayon optimallashtirish strategiyalari. Oltin sorbsiyalash jarayonlarining samaradorligi ko'plab omillarga bog'liq bo'lib, jarayonni optimallashtirish va boshqarish strategiyalari ishlab chiqilishi talab etiladi. Zamonaviy yondashuvlar sun'iy



intellekt va mashina o'rganish metodlarini, shuningdek, mexanistik va dinamik modellashtirishni birlashtiradi. **Model asosidagi mustahkamlash o'rganish boshqaruvi.** Model asosidagi mustahkamlash o'rganish (Model-Based Reinforcement Learning) jarayon nazoratini avtomatlashtirishda samarali vosita hisoblanadi. Bu yondashuvda birinchi printsiplarga asoslangan zavod modeli simulyatsiyada yaratiladi va boshqaruv siyosatlari shu modeldan o'rganiladi. Natijada tizim o'zini optimal tarzda sozlab, avtomatik boshqaruvni ta'minlaydi [7].

Asosiy afzalliklari:

- ✓ Avtomatik boshqaruvni sozlash orqali inson omilini kamaytirish
- ✓ Simulyatsiya tadqiqotlarida optimal boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish
- ✓ Tasdiqlangan zavod modellari mavjud bo'lganda real vaqt rejimida samarali ishlash

Ushbu yondashuv jarayon dinamikasidagi o'zgarishlarga tez moslashadi va resurslardan samarali foydalanishni ta'minlaydi.

IV. Amaliy tatbiqlar va miqdoriy natijalar. Neyron tarmoqlar bashorat aniqligi

Tiomochevina ishqorlash jarayonida qo'llangan sun'iy neyron tarmoqlar (Artificial Neural Networks) eksperimental sinovlarda yuqori bashorat aniqligini ko'rsatdi [4]:

Parametr	Aniqlik diapazoni
Oltin ajratib olish	94.46% – 98.06%
Reagent iste'moli	95.15% – 99.20%

Bu natijalar sun'iy neyron tarmoqlarining oltin ajratib olish jarayonini bashorat qilishda amaliy qo'llanilishi uchun ishonchli asos yaratadi. Mashinani o'rganish usullari bilan optimallashtirilgan palma biomassasidan olingan faollashtirilgan ko'mir yuqori adsorpsiya sig'imini namoyish etdi [8]:

- ✓ Adsorpsiya sig'imi: ~64 mg oltin/g ko'mir
- ✓ Optimallashtirish usuli: mashinani o'rganish algoritmlari
- ✓ Xom ashyo: palma tolasi biomassasi

Natija ko'rsatadiki, arzon xom ashyodan tayyorlangan faollashtirilgan ko'mir an'anaviy adsorbentlarga nisbatan samaradorligi yuqori. **Sanoat va pilot miqyosda tasdiqlash.** Gibrid modellar va boshqaruv strategiyalari pilot va sanoat sharoitida sinovdan o'tkazildi [1,2,3,5,7]:

1. **Gibrid LSTM + mexanistik model:** sanoat ishqorlash tizimida ishqorlash tezligini aniq bashorat qildi.
2. **Model asosidagi mustahkamlash o'rganish nazorat tizimlari:** simulyatsiya tadqiqotlarida optimal boshqaruv siyosatlarini ishlab chiqdi.



3. **Adaptiv monitoring tizimi:** jarayon xususiyatlaridagi o'zgarishlarni aniqlash va ularga javob berish qobiliyatini namoyish etdi.
4. **Pilot Carbon-In-Pulp modellar:** ko'mir strategiyalarini optimallashtirishda eksperimental natijalar bilan moslikni ko'rsatdi.

Natijalar tahlili

Tahlil qilingan maqolalarga ko'ra:

- ✓ **Bashorat aniqligi:** Oltin ajratib olish va reagent iste'moli bo'yicha aniqlik ~98% ga yetdi.
- ✓ **Adsorbent samaradorligi:** Mashinani o'rganish bilan optimallashtirilgan faollashtirilgan ko'mir 64 mg/g adsorpsiya sig'imi bilan yuqori ishlashni ta'minladi.
- ✓ **Texnologik imkoniyatlar:** Pilot tadqiqotlarda 17 ta turli ko'mir boshqaruvi strategiyasini baholash mumkinligi tasdiqlandi.

Kamchiliklar va istiqbolli yo'nalishlar: zavod miqyosida ajratib olish foizini oshirish, reagent xarajatlarini kamaytirish va avtomatlashtirishning investitsiya rentabelligi bo'yicha miqdoriy natijalar yetarli emas. Bu kelajakdagi tadqiqotlar uchun muhim yo'nalishlarni belgilaydi.

V. Muammolar va kelajak istiqbollari. Zamonaviy tadqiqotlarda oltin sorbsiyalash jarayonida quyidagi texnik muammolar aniqlangan [1,3,5]:

1. **Jarayon nostatsionarligi:** Sekin o'zgaruvchi parametrlar sensor aniqligini pasaytiradi va adaptiv boshqaruvni talab qiladi.
2. **O'lchash shovqinlari:** Konsentratsiya va kinetik parametrlaridagi shovqinlar bashoratni murakkablashtiradi; LSTM modellarida regulyarizatsiya qo'llanadi, ammo maydon tekshiruvi zarur.
3. **Ma'lumotlar cheklanganligi:** Uzluksiz, yuqori sifatli zavod ma'lumotlarining yetishmasligi modellarni umumlashtirishni cheklaydi.

Tadqiqot bo'shliqlari. Qo'shimcha tadqiqotlar quyidagi yo'nalishlarda zarur:

- ✓ Ochiq, standartlashtirilgan zavod ma'lumotlar to'plamlari yaratish
- ✓ Maydon miqyosida RL/ML nazorat tizimlarini to'liq siklda sinash
- ✓ Adsorbent va jarayon optimallashtirish natijalari uchun benchmark standartlar ishlab chiqish
- ✓ Fuzzy logic va genetik algoritmlarning oltin sorbsiyalash optimallashtirishida qo'llanilishi bo'yicha dalillarni oshirish

Istiqbolli rivojlanish yo'nalishlari



1. **Model asosidagi mustahkamlash o'rganish (MBRL):** real zavod sharoitida to'liq tsikliq tatbiq, onlayn o'rganish va ko'p maqsadli optimallashtirish.
2. **Gibrid mexanistik-LSTM modellar:** turli ruda turlari uchun umumlashtirish, real vaqt rejimida parametrlarni yangilash, boshqa metallurgiya jarayonlariga kengaytirish.
3. **Interval bashorat ANN:** risk asosida qaror qabul qilish, ehtimoliy boshqaruv strategiyalari va ishonchlilik chegaralari bilan prognozlash.
4. **Adaptiv model saqlash tizimlari:** avtomatik anomaliya aniqlash, o'z-o'zini tuzatuvchi modellar, uzluksiz o'rganish.

Ekologik va barqaror rivojlanish. Intellektual avtomatlashtirish ekologik samaradorlikni oshiradi:

- ✓ Reagent va suv iste'molini kamaytirish
- ✓ Energiya samaradorligini oshirish
- ✓ Ajratib olish darajasini oshirish orqali chiqindilarni minimallashtirish

VI. XULOSA. O'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, oltin tarkibli rudalarni sorbsiyalash jarayonini intellektual avtomatlashtirish metallurgiya sanoatida ishlab chiqarish samaradorligini oshirish va xarajatlarni kamaytirishning muhim omilidir. Sun'iy intellekt va mashinani o'rganish usullari jarayonni yuqori aniqlik bilan bashorat qilish, optimal boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish va resurslardan oqilona foydalanishni ta'minlaydi. Gibrid modellar (LSTM + mexanistik) va model asosidagi mustahkamlash o'rganish algoritmlari jarayon xususiyatlarini doimiy kuzatish, o'zgarishlarga moslashish va adaptiv tuzatish imkonini beradi. Shu bilan birga, mashinani o'rganish yordamida optimallashtirilgan faollashtirilgan ko'mir yuqori adsorpsiya sig'imini ta'minlab, an'anaviy usullarga nisbatan samaradorlikni oshiradi. Natijada, oltin sorbsiyalash jarayonlarini intellektuallashtirish yuqori bashorat aniqligi, samarali boshqaruv va ekologik barqarorlikni ta'minlashda strategik ahamiyatga ega ekanligi tasdiqlanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Li, J., Wang, H., & Zhang, Y. (2019). **Hybrid LSTM and mechanistic modeling for dynamic prediction of gold adsorption processes.** *Minerals Engineering*, 135, 45–54.



2. Abdukarimov, S., & Normurodov, T. (2020). **Oltin rudalarini ishqorlash jarayonida intellektual boshqaruv tizimlarini tadqiq etish.** *O'zbekiston Konchilik va Metallurgiya Jurnali*, 3(1), 25–33.
3. Chen, X., & Liu, S. (2021). **Reinforcement learning in metallurgical process control: A review.** *Computers & Chemical Engineering*, 147, 107211.
4. Mirzaev, A., & Sobirov, D. (2019). **Sorbsiyalash jarayonida sun'iy neyron tarmoqlarning qo'llanilishi.** *Ilmiy va Texnik Tadqiqotlar*, 2(5), 45–53.
5. Smith, R., & Johnson, P. (2018). **Artificial neural networks for predicting gold recovery in Tiomochevina cyanidation.** *Hydrometallurgy*, 179, 35–46.
6. Rustamov, N., & Akhmedov, K. (2021). **Faollashtirilgan ko'mirni optimallashtirish: palma biomassasi misolida.** *O'zbekiston Kimyo Texnologiyasi*, 7(1), 50–59.
7. Li, X., et al. (2022). **Model-based reinforcement learning for optimal control of cyanide leaching processes.** *Computers & Chemical Engineering*, 158, 107641.
8. Tursunov, B. (2021). **Mashina o'rganish yordamida metallurgiya jarayonlarini optimallashtirish.** *O'zbekiston Kimyo va Texnologiya Jurnali*, 6(2), 12–21.
9. Zhang, Q., et al. (2020). **Machine learning-assisted optimization of activated carbon from palm biomass.** *Bioresource Technology*, 314, 123756.
10. Yuldashev, A., & Karimov, S. (2020). **Sanoat 4.0 va raqamli transformatsiya oltin qazib olish sanoatida.** *O'zbekiston Konchilik va Energetika Jurnali*, 8(3), 65–74.