

UO‘K: 622.7:622.342.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.24

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MIS-PORFIR MA'DANIDAN OLTIN VA KUMUSHNI MARKAZDAN QOCHMA KONSENTRATOR YORDAMIDA AJRATIB OLIISHDA G-OMIL VA SIKL VAQTI TA'SIRINI FAKTORLI TAJRIBA ASOSIDA BAHOLASH



**Larionov Sergey
Vladimirovich**

“Olmaliq kon-metallurgiya” AJ
boshqaruv raisi o‘rinbosari, bosh
muhandis v.b., Olmaliq,
O‘zbekiston
E-mail: s.larionov@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0007-0681-6552
Science ID: BTV-0738-0114



**Ergashev Mahmud
Axbaraliyevich**

Olmaliq davlat texnika instituti
tayanch doktoranti, Olmaliq,
O‘zbekiston
E-mail: mahmude423@gmail.com
ORCID ID: 0009-0009-3067-0412
Science ID: MTV-0425-0012



**Sidiqov Ravshan
Mirzabekovich**

“Olmaliq kon-metallurgiya” AJ 1-
mis boyitish fabrikasi direktori,
Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: r.sidikov@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0010-4251-8187
Science ID: BTV-0852-0008



**Axmadaliyev Alisher
Madaminovich**

“Olmaliq kon-metallurgiya” AJ 1-
mis boyitish fabrikasi bosh
muhandisi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: a.ahmadaliyev@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0009-4358-8144
Science ID: BTV-0521-0020

Annotatsiya. Ishda mis-porfir ma'danidan oltin va kumushni markazdan qochma konsentratorida ajratib olish jarayonining rejim omillari o'rganildi. Ma'dan kambag'al, undagi oltin miqdori 0,38 g/t; metallning asosiy massasi (69,12%) 2–8 mkm o'lchamdagi zarralarga to'g'ri keladi. Tajribalar «Knelson» KC-MD3 laboratoriya apparatida, ma'dan 80% –0,074 mm gacha maydalangan holatda bajarildi. Markazdan qochma kuch (G) 30 dan 150×g gacha, sikl vaqti (t) 10 dan 50 min gacha o'zgartirildi. Bir omilli tajribalar ajralib chiqishning G bo'yicha aniq maksimumga ega ekanini (54,0%, $G \approx 90 \times g$), sikl vaqti bo'yicha esa ≈ 30 min dan keyin platoga chiqishini ko'rsatdi. O'lcham sinflari kesimidagi tahlil kuchning yirik (+74 mkm) zarralarga deyarli ta'sir qilmasligini, 2–8 mkm sinfdan esa ajralib chiqish 28% dan 38% gacha o'zgarishini aniqladi. Markaziy nuqtasi uch marta takrorlangan 2^o to'liq faktorli tajriba va dispersion tahlil G ning chiziqli effekti +3,25%, sikl vaqtiniki +2,75%, o'zaro ta'sir –1,25%, egrilik esa +5,18% ($p < 0,001$) ekanini ko'rsatdi. Bu javob sirtining noxiziqli ekanini va optimumning tajriba sohasi ichida ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 min) joylashganini isbotlaydi. Kumush bo'yicha ko'rsatkichlar ham qayd etildi: uning ajralib chiqishi oltinnikiga o'xshash qonuniyatga bo'ysunib, maqbul rejimda 25,0% ni, boyitmadagi kumush tarkibi esa 108 g/t ni tashkil etadi.

Kalit so'zlar: mis-porfir ma'dan, G-omil, sikl vaqti, oltin va kumush ajralib chiqishi, to'liq faktorli tajriba, dispersion tahlil, javob sirti, egrilik effekti, jarayonni matematik modellashirish.

Received: 19.07.2026

Accepted: 06.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ G-ФАКТОРА И ВРЕМЕНИ ЦИКЛА ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ МЕДНО-ПОРФИРОВОЙ РУДЫ С ПОМОЩЬЮ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОНЦЕНТРАТОРА НА ОСНОВЕ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Ларионов Сергей
Владимирович**

Заместитель председателя
правления АО «Алмалыкский
горно-металлургический
комбинат», исполняющий
обязанности главного инженера,
Алмалык, Узбекистан

**Ершегев Махмуд
Ахбаралиевич**

Базовая докторантура
Алмалыкского государственного
технического института,
Алмалык, Узбекистан

**Сидиков Равшан
Мирзабекович**

Директор 1-й медно-
обогажительной фабрики АО
«Алмалыкский горно-
металлургический комбинат»,
Алмалык, Узбекистан

**Ахмадийев Алишер
Мадаминovich**

Главный инженер
медеплавильной обогажительной
фабрики № 1 АО «Алмалыкский
горно-металлургический
комбинат», Алмалык,
Узбекистан

Аннотация. В работе изучены режимные факторы процесса извлечения золота из медно-порфировой руды на центробежном концентраторе. Руда бедная, содержание золота 0,38 г/т; основная масса металла (69,12 %) приходится на частицы крупностью 2–8 мкм. Опыты выполнены на лабораторном аппарате «Knelson» KC-MD3 при измельчении руды до 80% класса –0,074 мм. Центробежная сила (G) изменялась от 30 до 150 ×g, время цикла (t) — от 10 до 50 мин. Однофакторные опыты показали наличие выраженного максимума извлечения по G (54,0% при $G \approx 90 \times g$) и выход на плато по времени цикла после ≈ 30 мин. Анализ по классам крупности установил, что сила практически не влияет на крупные (+74 мкм) частицы, тогда как в классе 2–8 мкм извлечение изменяется от 28 до 38%. Полный факторный эксперимент 2^2 с трёхкратным повторением центральной точки и дисперсионный анализ дали линейный эффект G +2,75%, времени цикла +2,25%, взаимодействие –1,75%, кривизну +5,43% ($p < 0,001$). Это доказывает нелинейность поверхности отклика и расположение оптимума внутри области эксперимента ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 мин). Также зафиксированы показатели по серебру: его извлечение подчиняется той же закономерности и в оптимальном режиме составляет 25,0% при содержании серебра в концентрате 108 г/т.

Ключевые слова: медно-порфировая руда, G-фактор, время цикла, извлечение золота и серебра, полный факторный эксперимент, дисперсионный анализ, поверхность отклика, эффект кривизны, математическое моделирование процесса.

EVALUATION OF THE EFFECT OF G-FACTOR AND CYCLE TIME ON GOLD AND SILVER RECOVERY FROM COPPER-PORPHYRY ORE USING A CENTRIFUGAL CONCENTRATOR BASED ON A FACTORIAL EXPERIMENT

**Larionov Sergey
Vladimirovich**

Deputy Chairman of the
Management Board of Almalyk
Mining and Metallurgical Complex
JSC, Acting Chief Engineer,
Almalyk, Uzbekistan

**Ershegeev Makhmud
Akhbaraliyevich**

Basic doctoral program at Almalyk
State Technical Institute, Almalyk,
Uzbekistan

**Sidikov Ravshan
Mirzabekovich**

Director of the 1st Copper
Concentration Plant of JSC
Almalyk Mining and Metallurgical
Complex, Almalyk, Uzbekistan

**Akhmadiyev Alisher
Madaminovich**

Chief Engineer of Copper Smelting
and Processing Plant No. 1, JSC
“Almalyk Mining and Metallurgical
Complex,” Almalyk, Uzbekistan

Abstract. The work examines the operating factors of gold and silver recovery from the copper-porphyry ore on a centrifugal concentrator. The ore is low-grade, containing 0.38 g/t Au; the bulk of the metal (69.12%) occurs as 2–8 μm particles. The tests were run on a laboratory Knelson KC-MD3 unit with the ore ground to 80% passing 0.074 mm. The centrifugal force (G) was varied from 30 to 150 $\times g$ and the cycle time (t) from 10 to 50 min. Single-factor tests showed a distinct maximum of recovery with respect to G (54.0% at $G \approx 90 \times g$) and a plateau with respect to cycle time beyond ≈ 30 min. A size-by-size analysis established that the force has almost no effect on coarse (+74 μm) particles, whereas in the 2–8 μm class recovery varies from 28 to 38%. A 2^2 full factorial design with a triplicated centre point, processed by analysis of variance, yielded a linear effect of G of +3.25%, of cycle time +2.75%, an interaction of –1.25% and a curvature of +5.18% ($p < 0.001$). This proves the non-linearity of the response surface and the location of the optimum inside the experimental region ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 min).

Silver recovery was also recorded: it follows the same pattern as gold and reaches 25.0 % at the optimum, with 108 g/t Ag in the concentrate.

Keywords: *copper-porphyry ore, G-factor, cycle time, gold and silver recovery, full factorial design, analysis of variance, response surface, curvature effect, process mathematical modelling.*

Kirish. Xomashyoning texnologik xossalari, pirovardida esa tanlanadigan sxema ham, uning moddiy-mineralogik tavsifidan kelib chiqadi. Tadqiq etilayotgan mis-porfir ma'dani uchun bunday tavsif avvalgi ishlarimizda olingan [12–14]: oltin asosan sof tug'ma holatda uchraydi (o'rtacha proba 890), uning 69,12% i 2–8 mkm sinfga jamlangan, erkin shakldagi ulushi 26,62% ni, sianlash bilan eritmaga o'tish darajasi esa 89,88 % ni tashkil etadi; ayrim donalarning yirikligi 500 mkm gacha yetadi. Bu ko'rsatkichlar bir vaqtning o'zida ham imkoniyat, ham cheklovni anglatadi. Oltinning erkin holatda bo'lishi uni flotatsiyagacha zichlik farqi bo'yicha ajratib olishga yo'l ochadi; metall massasining nozik sinfdagi to'planishi esa bunday ajratishni an'anaviy apparatlar bilan amalga oshirish imkonini bermaydi.

Shlyuz, konsentratsion stol yoki vintli separatora ajratuvchi kuch sifatida faqat og'irlik kuchi ishlaydi. Aynan shu sabab ularning imkoniyati 50–75 mkm atrofida tugaydi: bundan mayda zarra uchun cho'kish tezligi oqim ta'siriga qarshi tura olmaydi [11]. Ma'danimizdagi oltinning asosiy qismi esa shu chegaradan pastda joylashgan, shuning uchun tanlov markazdan qochma (fluidizatsiyalangan) konsentratorlarga to'xtadi. Ularda zarraga ta'sir etuvchi tezlanish o'nlab, ba'zan yuzlab marta kuchaytiriladi va nozik og'ir zarralar ham ushlanish imkoniga ega bo'ladi. Bunday oldindan boyitishning yana bir afzalligi — u reagent talab qilmaydi va erkin oltinni flotatsiyaga qadar alohida, yuqori sifatli mahsulotga chiqaradi.

Markazdan qochma konsentratorning ko'rsatkichlari uning ish rejimiga o'ta sezgir. Rejim noto'g'ri tanlansa, apparatning nazariy imkoniyati amalda ro'yobga chiqmay qoladi. Ta'sir etuvchi omillar orasida markazdan qochma kuch (G-omil) bilan sikl vaqti yetakchi o'rinni egallaydi: birinchisi zarraning cho'kish tezligini, ikkinchisi rifllardagi boyitma qatlamining to'lish darajasini boshqaradi.

Ushbu tadqiqot ishining yangiligi ikki jihatda namoyon bo'ladi. Birinchi jihat, markazdan qochma kuch optimumining ma'dan oltinining o'lcham-fazaviy tarkibi bilan miqdoriy bog'liqligi o'lcham

sinflari kesimida birinchi marta ochib beriladi. Ikkinchi jihat, optimumning tajriba sohasi ichida joylashgani egrilik effekti orqali statistik tasdiqlanadi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. So'nggi o'n yilliklarda kuchaytirilgan gravitatsiya apparatlari oltin saqllovchi xomashyoni qayta ishlashda mustahkam o'rin egalladi [10]; bu guruhda «Knelson» konsentratori eng ko'p qo'llaniladigan yechim hisoblanadi. Chen [1] uning konstruktiv rivojlanishini umumlashtirar ekan, rotor tezligi va fluidizatsiyalovchi suv sarfini asosiy boshqariluvchi parametrlar deb belgilaydi, biroq bu parametrlarning maqbul qiymatlari xomashyoga qarab qanday siljishi ochiq qoldiriladi. «Falcon» apparati bo'yicha Farajzadeh va Chehreh Chelgani [2] olgan natijalar ham shu yo'nalishda: ajratish mexanizmi tavsiflanadi, ammo rejimni tanlash mezonini umumiy holda beriladi. Majumder va Barnwal [6] bu vaziyatga bevosita izoh beradi — mavjud modellarning aksariyati empirik bo'lib, ular ma'dan turiga bog'liq koeffitsiyentlarsiz ishlamaydi.

Tajribani matematik rejalashtirish shu bo'shliqni to'ldirish vositasi sifatida qaraladi. Marion va hammualliflar [7] laboratoriya «Knelson» konsentratorida nozik hamda past zichlikdagi minerallar uchun rejim omillarini to'liq faktorli reja bo'yicha baholagan; Katwika va hammualliflar [4] shunga o'xshash yondashuvni mis-kobalt boyitish chiqindilarida sinab ko'rgan. Xomashyoni tavsiflash tomonidan esa Laplante va hammualliflar [5] gravitatsion ajraladigan oltin (GRG) tushunchasini va uni laboratoriyada aniqlash tartibini taklif qilgan. Ko'rinadiki, statistik reja ham, xomashyoni baholash usuli ham allaqachon shakllangan, biroq ular odatda alohida-alohida qo'llaniladi.

Ko'rib chiqilgan ishlar markazdan qochma ajratishning umumiy qonuniyatlari yetarlicha o'rganilganini ko'rsatadi. Ayni paytda kuch optimumini muayyan ma'dan oltinining o'lcham-fazaviy tarkibi bilan miqdoriy bog'lash masalasi, ayniqsa Olmaliq kon hududi mis-porfir ma'danlari misolida, deyarli ko'tarilmagan. Ushbu ish aynan

shu bo'shliqqa qaratilgan.

Tadqiqot uchun «Yoshlik I» hamda Qalmoqqir koni [3] mis-porfir ma'danining texnologik namunasi olindi: Au 0,38 g/t, Cu 0,34%, Mo 0,0053%. Tajribalar «Knelson» KC-MD3 konsentratorida, ma'dan 80% -0,074 mm gacha maydalangan holatda bajarildi. Har bir tajribada boyitma va chiqindi mahsulotlari alohida olinib, ulardagi metall tarkibi probirlash (assay) hamda atom-absorbsion usullarda aniqlandi. Texnologik ko'rsatkichlar, ya'ni mahsulot unumi (γ), metall ajralib chiqishi (ϵ) va boyitma tarkibi (β), metall balansi bo'yicha hisoblandi.

Markazdan qochma maydonda zarraga ta'sir etuvchi nisbiy tezlanish, ya'ni G-omil, quyidagicha aniqlanadi:

$$G = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{\pi^2 N^2 r}{900 g} \quad (1)$$

bu yerda ω — rotorning burchak tezligi, rad/s; N — aylanishlar soni, ayl/min; r — rotor radiusi, m; g — erkin tushish tezlanishi, m/s². KC-MD3 rotori uchun (r ≈ 0,0375 m) G = 90 qiymati taxminan 1460 ayl/min ga mos keladi.

Zarralarning markazdan qochma maydondagi cho'kish tezligini Stoks qonunining kuchaytirilgan ko'rinishida baholash mumkin:

$$v_g = \frac{d^2(\rho_s - \rho_f)gG}{18\mu} \quad (2)$$

bu yerda v_g — zarraning markazdan qochma maydondagi cho'kish tezligi, m/s; d — zarra diametri, m; ρ_s va ρ_f — mos ravishda zarra va suyuqlik zichligi, kg/m³; μ — suyuqlikning dinamik qovushqoqligi, Pa·s. Ifodadan ikki bog'liqlik kelib chiqadi: tezlik zarra diametrining kvadratiga, shuningdek G-omilga chiziqli tarzda bog'langan. Demak, o'lcham kichraygan sari yo'qolgan tezlikni faqat maydonni kuchaytirish hisobiga qoplash mumkin. Agar zarraning ishonchli ushlanishi uchun kerakli eng kichik cho'kish tezligi o'zgarmas deb qabul qilinsa, gravitatsion ajratib olinadigan eng kichik zarra o'lchami markazdan qochma kuchning kvadrat ildiziga teskari proporsional bo'ladi, ya'ni $d \sim G^{-0.5}$; ajratib olinadigan eng kichik oltin o'lchamini ikki barobar kichraytirish uchun kuchni taxminan to'rt barobar oshirish talab etiladi.

Gravitatsion ajratishning printsiplial imkoniyati konsentratsiya mezoni (CC) yordamida baholanadi:

$$CC = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (3)$$

bu yerda ρ_h va ρ_l — mos ravishda og'ir va yengil komponent zichligi, kg/m³; ρ_f — suyuqlik zichligi, kg/m³. Amaliyotda CC qiymati 2,5 dan oshsa, zichlik farqi ajratish uchun yetarli deb qabul qilinadi [8, 11]. «Yoshlik I» va Qalmoqqir ma'dani uchun oltin (proba 890, $\rho \approx 17,5$ g/sm³) va kvars ($\rho \approx 2,65$ g/sm³) juftligida CC ≈ 10,0 bo'lib, bu oltinni hatto nozik sohada ham gravitatsion ajratish uchun juda qulay sharoitni anglatadi. Solishtirish uchun, xalkopirit uchun CC ≈ 1,94, molibdenit uchun esa CC ≈ 2,24 — ya'ni mis va molibden minerallari gravitatsiya bilan ancha kam ajraladi, bu esa gravitatsion boyitmada ularning kam to'planishini oldindan tushuntiradi.

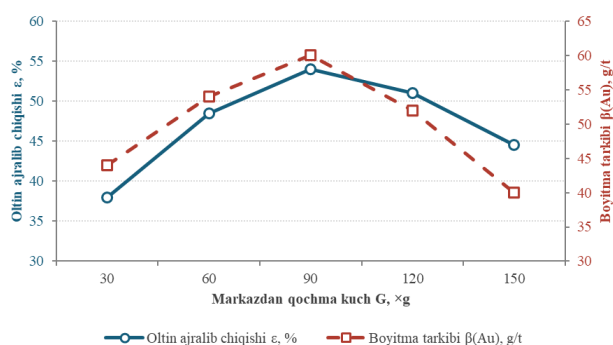
Omillarning birgalikdagi ta'sirini o'rganish uchun 2² to'liq faktorli reja qo'llanildi. Omillar sifatida markazdan qochma kuch G (quyi sath 60×g, yuqori sath 120 ×g) hamda sikl vaqti t (20 va 40 min) olindi; kodlangan o'zgaruvchilar $x_1 = (G-90)/30$ va $x_2 = (t-30)/10$ ko'rinishida kiritildi. Bunday reja har bir omilning alohida hissasini ham, ularning birgalikdagi ta'sirini ham ajratib ko'rsatadi. Reja markazi (90 ×g; 30 min) uch marta takrorlandi — bu takrorlashlar ikki vazifani bajardi: tasodifiy xatolik dispersiyasini baholadi va javob sirtining egriligini tekshirish uchun mustaqil qiyoslash nuqtasini berdi. Markaziy nuqta natijasining burchak nuqtalari o'rtachasidan chetlanishi chiziqli modelning yetarli emasligini, ya'ni kvadratik hadlar zarurligini bildiradi. Barcha natijalar dispersion tahlil (ANOVA) yordamida qayta ishlandi.

Natijalar. Markazdan qochma kuchning ta'sirini aniqlash maqsadida G qiymati 30 dan 150 ×g gacha o'zgartirildi, qolgan ko'rsatkichlar o'zgarishsiz saqlandi: sikl vaqti 30 min, yuvuvchi suv bosimi 50 kPa, qattiq faza 30 %. Natijalar 1-jadval va 1-rasmda berilgan.

1-jadval

Markazdan qochma kuchning oltin va kumush ajralib chiqishiga ta'siri

Markazdan qochma kuch G, ×g	Oltin ajralib chiqishi ϵ (Au), %	Boyitma tarkibi β (Au), g/t	Kumush ajralib chiqishi ϵ (Ag), %	Boyitma tarkibi β (Ag), g/t
30	38,0	44	17,0	79
60	48,5	54	22,0	97
90	54,0	60	25,0	108
120	51,0	52	23,3	94
150	44,5	40	20,1	72



1-rasm. Markazdan qochma kuchning oltin ajralib chiqishi (ε) va boyitma tarkibiga (β) ta'siri.

Tajriba natijalariga ko'ra, kuch ortishi bilan oltin ajralib chiqishi dastlab o'sadi: 30 ×g da 38,0% dan 90×g da 54,0% gacha ko'tariladi. Keyin pasayish boshlanadi va 150×g da ko'rsatkich 44,5% ga tushadi. Boyitmadagi oltin tarkibi ham 90 ×g da eng yuqori qiymatga, 60 g/t ga erishadi. Past kuchda markazdan qochma maydon ma'danning asosiy massasini tashkil etuvchi 2–8 mkm li zarralarni cho'ktirishga yetmaydi va ular chiqindi bilan yo'qoladi; bundan tashqari qatlamga yengil bo'sh jins qisman o'tib, boyitma sifatini tushiradi. Kumush ham shu qonuniyatga bo'ysunadi: uning ajralib chiqishi 30×g da 17,0% dan 90×g da 25,0% gacha oshib, boyitmadagi kumush tarkibi 108 g/t ga yetadi. Ikkala metall maksimumining bir xil nuqtaga to'g'ri kelishi kumushning sezilarli qismi tug'ma oltin bilan birikkan elektrum holatida bo'lishi bilan izohlanadi.

2-jadval

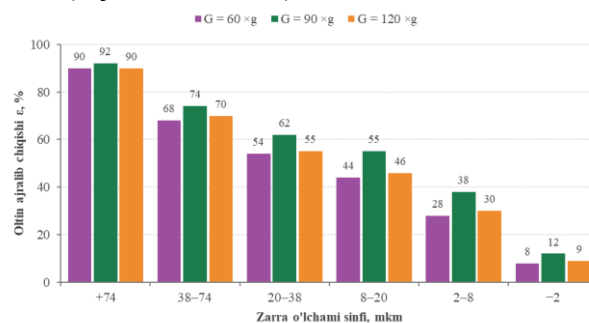
Turli markazdan qochma kuchda oltin ajralib chiqishining o'lcham sinflari bo'yicha taqsimoti, %

Zarra o'lchami sinfi, mkm	G = 60 ×g	G = 90 ×g	G = 120 ×g
+74	90	92	90
38–74	68	74	70
20–38	54	62	55
8–20	44	55	46
2–8	28	38	30
–2	8	12	9

Kuch me'yordan oshganda manzara bosh-qacha bo'ladi: zarralar qatlami ortiqcha zichlashadi, siljish kuchlari ta'sirida oldin ushlangan mayda oltin qatlamdan qayta yuviladi, ayni paytda kuchli maydon qatlamga o'rtacha zichlikdagi mineral zarralarni ham siqib kiritadi. Oqibatda ajralib chiqish ham, boyitma sifati ham pasayadi. Ikkala ko'rsatkich bo'yicha maqbul nuqta deyarli ustma-

ust tushadi va $G \approx 90 \times g$ atrofida joylashadi.

Ta'sir mexanizmini batafsilroq ochish uchun uch xil kuchda (60, 90 va 120×g) oltin ajralib chiqishi zarra o'lchami sinflari kesimida tahlil qilindi (2-jadval, 2-rasm).



2-rasm. Markazdan qochma kuchning oltin ajralib chiqishiga o'lcham sinflari kesimida ta'siri.

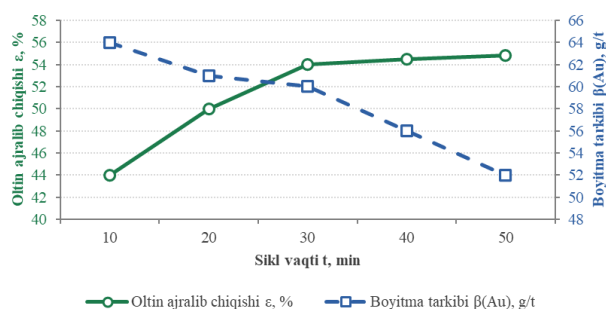
Tahlil natijasi quyidagicha bo'ldi. Yirik, ya'ni +74 mkm zarralar barcha rejimda deyarli to'liq (90–92%) ajratib olinadi va kuchga sezilarli bog'liq emas. Mayda sinflarda bog'liqlik keskin namoyon bo'ladi: 2–8 mkm sinfdagi ajralib chiqish $G=60 \times g$ da 28% dan $G=90 \times g$ da 38% gacha ko'tariladi, $G = 120 \times g$ da esa 30% ga qaytadi. Bu ma'dan oltinining granulometrik-fazaviy tarkibi bilan markazdan qochma kuch orasidagi bevosita bog'liqlikni isbotlaydi: mayda erkin oltinni ushlash uchun kuchli maydon zarur, biroq haddan ortiq kuch uni qayta yuvib yuboradi. $G \approx 90 \times g$ qiymati aynan shu ikki talab o'rtasidagi muvozanatni ta'minlaydi.

Sikl vaqtining, ya'ni boyitma to'planish davrining ta'siri alohida o'rganildi. U 10 dan 50 min gacha o'zgartirildi ($G=90 \times g$, suv bosimi 50 kPa, qattiq faza 30%). Natijalar 3-jadval va 3-rasmda keltirilgan.

3-jadval

Sikl vaqtining boyitish ko'rsatkichlariga (oltin va kumush) ta'siri

Sikl vaqti t, min	Oltin ajralib chiqishi ε(Au), %	Boyitma tarkibi β(Au), g/t	Kumush ajralib chiqishi ε(Ag), %	Boyitma tarkibi β(Ag), g/t
10	44,0	64	19,8	115
20	50,0	61	22,6	110
30	54,0	60	25,0	108
40	54,5	56	25,2	101
50	54,8	52	25,3	94



3-rasm. Sikl vaqtining oltin ajralib chiqishi (ε) va boyitma tarkibiga (β) ta'siri.

Sikl uzayishi bilan ajralib chiqish avvaliga tez o'sadi: 10 min da 44,0% dan 30 min da 54,0% gacha. So'ngra o'sish deyarli to'xtab, plato hosil bo'ladi (40 min da 54,5%, 50 min da 54,8%). Boyitma tarkibi esa aksincha, 64 g/t dan 52 g/t gacha kamayadi, chunki uzoq sikl davomida qatlamda bo'sh jins ko'proq to'planadi. Ajralib chiqishning to'yinishi va sifatning hali yuqoriligini hisobga olib, maqbul sikl vaqti sifatida ≈ 30 min qabul qilindi: bundan ortig'i ajralib chiqishga deyarli qo'shimcha bermaydi, ammo sifatni pasaytiradi hamda qatlamning haddan tashqari to'lib ketishi xavfini oshiradi. Kumush ajralib chiqishi ham shu tarzda 30 min dan keyin platoga chiqadi (25,0 $\rightarrow$ 25,3%), boyitmadagi kumush tarkibi esa 115 dan 94 g/t gacha pasayadi.

Ikki omilning birgalikdagi ta'sirini va ular orasidagi bog'liqlikni miqdoriy baholash uchun optimum atrofida 2^2 to'liq faktorli tajriba o'tkazildi. Reja matritsasi hamda olingan natijalar 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

2^2 to'liq faktorli tajriba matritsasi va natijalari

Tajriba №	G, xg	t, min	x_1	x_2	$\epsilon(\text{Au})$, %
1	60	20	-1	-1	45,0
2	120	20	+1	-1	49,5
3	60	40	-1	+1	49,0
4	120	40	+1	+1	51,0
5 (M)	90	30	0	0	53,6
6 (M)	90	30	0	0	54,0
7 (M)	90	30	0	0	53,8

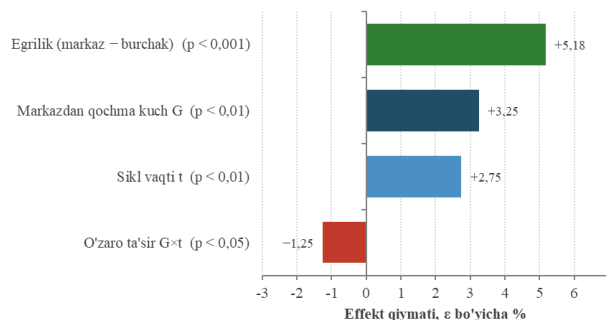
Faktorli tajriba natijalari dispersion tahlildan o'tkazilib, omillar effektlari va ularning statistik ahamiyati aniqlandi (5-jadval, 4-rasm). Markazdan qochma kuchning chiziqli effekti +3,25%, sikl vaqtiniki +2,75% ni tashkil etdi, ya'ni ikkala omil ham ajralib chiqishga musbat ta'sir ko'rsatadi. Omillarning o'zaro ta'siri ($G \times t$) kuchsiz va manfiy chiqdi (-1,25%): kuch yuqori bo'lganda sikl vaqtini

uzaytirishning qo'shimcha foydasi kamayadi.

5-jadval

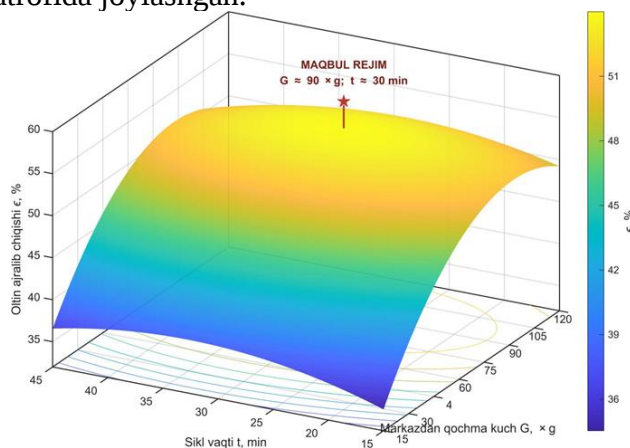
Faktorli tajriba natijalarining dispersion tahlili (ANOVA)

Dispersiya manbai	SS	df	MS	F	p
G (chiziqli)	10,56	1	10,56	264,1	< 0,01
t (chiziqli)	7,56	1	7,56	189,1	< 0,01
$G \times t$ (o'zaro ta'sir)	1,56	1	1,56	39,1	< 0,05
Egrilik	45,91	1	45,91	1148	< 0,001
Xatolik (markaz)	0,08	2	0,04	—	—
Jami	65,68	6	—	—	—



4-rasm. Omillar effektlari va ularning statistik ahamiyati diagrammasi.

Eng e'tiborli natija markaziy nuqta bilan bog'liq. Undagi o'rtacha ajralib chiqish 53,8 % bo'lib, burchak nuqtalari o'rtachasidan (48,6 %) ancha yuqori. Bu +5,18 % li kuchli musbat egrilikni bildiradi. Dispersion tahlil farqning statistik ahamiyatli ekanini tasdiqladi ($F = 1148$; $p < 0,001$), tajriba xatoligi esa juda kichik chiqdi ($MS = 0,04$). Demak, javob sirti qavariq bo'lib, optimum reja sohasining ichida, taxminan $90 \times g$ va 30 min atrofida joylashgan.



5-rasm. Oltin ajralib chiqishi (ε) javob sirtining markazdan qochma kuch va sikl vaqti bo'yicha izochiziqlari.

Faktorli tajriba natijalari asosida kodlangan

o'zgaruvchilarda javob sirtining ikkinchi tartibli yaqinlashishi qurildi, uning izochiziqlari 5-rasmda tasvirlangan. Diagrammada javob sirti markaz tomon ko'tarilib, yopiq qavariq shakl hosil qiladi. Bu ekstremum reja burchaklarida emas, uning ichida ekanini va chiziqli modelning yaroqsizligini ko'rgazmali tarzda tasdiqlaydi.

Muhokama. Tajriba ishi natijalari markazdan qochma kuchning ta'siri ikki qarama-qarshi mexanizm muvozanatidan iborat ekanini ko'rsatadi. Birinchisi cho'ktirish: kuch ortgan sari mayda og'ir zarralarning rotor devoriga cho'kish tezligi oshadi va ular rifllarda ushlanib qoladi. Ikkinchisi qayta yuvish: kuch me'yordan oshsa, boyitma qatlami zichlashadi, undagi siljish kuchlari kuchayadi va ilgari ushlangan mayda oltin chiqarib yuboriladi. Birinchi mexanizm kuchga chiziqli yaqin tarzda, ikkinchisi kuchliroq nochiziqlik bilan ta'sir qilgani bois ularning yig'indisi aniq maksimumga ega funktsiya beradi. 1-rasmdagi egri chiziqning shakli hamda dispersion tahlilda aniqlangan musbat egrilik shu bilan izohlanadi.

O'lcham sinflari bo'yicha tahlil (2-rasm) bu talqinni bevosita quvvatlaydi. Yirik zarralar uchun cho'kish tezligi allaqachon yetarli, shu sababli kuchni oshirish qo'shimcha foyda bermaydi. 2–8 mkm sinfda esa, ya'ni ma'dan oltinining asosiy massasi joylashgan sohada, ajralib chiqish kuchga keskin sezgir va aynan shu sinf umumiy ko'rsatkichning optimumini shakllantiradi. Bundan kelib chiqadiki, markazdan qochma kuch optimumi apparatning universal tavsifi emas, balki muayyan ma'dan oltinining o'lcham taqsimotiga bog'liq kattalikdir. Bu xulosa Majumder va Barnwal [6] ta'kidlagan modellarning ma'danga bog'liqligi qoidasiga mos tushadi hamda Marion [7] natijalari bilan sifat jihatidan uyg'unlashadi.

Sikl vaqtining ta'sirini boyitma qatlamining to'lish dinamikasi tushuntiradi. Sikl boshida rifllar bo'sh, og'ir zarralar uchun joy ko'p; vaqt o'tgan sari rifllar to'ladi va yangi kelayotgan zarralarni ushlash imkoniyati kamayadi. Shuning uchun ajralib chiqish avvaliga tez o'sib, keyin to'yinadi. Uzoq sikl davomida qatlamda o'rtacha zichlikdagi minerallar ham to'planib, boyitma sifatini tushiradi. O'zaro ta'sirning manfiy ishorasi ham ayni shu bilan bog'liq: yuqori kuchda qatlam tezroq to'yinadi.

Egrilikning statistik ahamiyatli chiqishi muhim metodologik xulosaga olib keladi. Jarayonni

chiziqli model bilan to'liq tavsiflab bo'lmaydi, optimumni aniq topish uchun ikkinchi tartibli model kerak. Amalda bu keyingi bosqichda tajriba sohasini o'qiy nuqtalar bilan kengaytirib, markaziy kompozitsion reja asosida kvadratik regressiya modelini qurishni taqozo qiladi.

Amaliy va raqamli boshqaruv nuqtai nazaridan kuchni qat'iy bir qiymatda emas, maqbul atrofidagi tor oraliqda (80–100 ×g) ushlab turgan ma'qul: shu oraliqda oltin ajralib chiqishi 52% dan pastga tushmaydi. Kuch rotor aylanishlar soni orqali (1) ifoda bo'yicha bevosita sozlanadi, KC-MD3 uchun 90 ×g qiymatiga taxminan 1460 ayl/min mos keladi. Bu esa parametrlarni chastota o'zgartirgich yordamida avtomatik boshqarishga to'liq imkon beradi. Aniqlangan effektlar va egrilik qiymatlari jarayonning raqamli modelini qurish uchun tayyor sonli asos vazifasini o'taydi [9].

Xulosa. “Yoshlik I” va Qalmoqqir konlari mis-porfir ma'danidan oltinni «Knelson» KC-MD3 konsentratorida ajratib olishda markazdan qochma kuch hal qiluvchi omil ekanini aniqlandi: G ning 30 dan 150×g gacha o'zgarishida ajralib chiqish $G \approx 90 \times g$ da 54,0% maksimumga erishadi, boyitma tarkibi ham shu nuqtada eng yuqori (60 g/t) bo'ladi.

Kuch optimumi ma'dan oltinining o'lcham-fazaviy tarkibi bilan bevosita bog'liq: yirik (+74 mkm) zarralar barcha rejimda 90–92 % darajasida ajratiladi, 2–8 mkm sinfda esa ajralib chiqish 28 % dan 38 % gacha o'zgaradi va aynan shu sinf umumiy optimumni shakllantiradi.

Sikl vaqti ortishi bilan ajralib chiqish ≈ 30 min dan keyin platoga chiqadi (54,0 → 54,8 %), boyitma tarkibi esa 64 dan 52 g/t gacha pasayadi. Shu sababli maqbul sikl vaqti sifatida ≈ 30 min asoslandi.

2² to'liq faktorli tajriba va dispersion tahlil markazdan qochma kuchning chiziqli effekti +3,25%, sikl vaqtiniki +2,75%, ularning o'zaro ta'siri esa –1,25% ekanini ko'rsatdi; barcha effektlar statistik ahamiyatli.

Egrilik effekti +5,18% ($F=1148$; $p<0,001$) bo'lib, javob sirtining nochiziqli ekanini va optimumning tajriba sohasi ichida ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 min) joylashganini isbotlaydi. Demak, jarayonni to'liq tavsiflash uchun ikkinchi tartibli regressiya modeli talab etiladi.

Amaliy jihatdan markazdan qochma kuchni 80–100×g oralig'ida ushlab turish tavsiya etiladi; KC-MD3 uchun bu rotorning taxminan 1460

ayl/min tezligiga mos keladi va parametr chastota o'zgartirgich yordamida avtomatik boshqarishga to'liq yaroqlidir.

Amaliy jihatdan markazdan qochma kuchni 80–100×g oralig'ida ushlab turish tavsiya etiladi;

KC-MD3 uchun bu rotorning taxminan 1460 ayl/min tezligiga mos keladi va parametr chastota o'zgartirgich yordamida avtomatik boshqarishga to'liq yaroqlidir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Chen, Q., Yang, H.-Y., Tong, L.-L., Niu, H.-Q., Zhang, F.-S., & Chen, G.-M. (2020). Research and application of a Knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*, 152, 106339. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106339>
- [2] Farajzadeh, S., & Chehreh Chelgani, S. (2022). Gravity separation by Falcon concentrator—An overview. *Separation Science and Technology*, 57(13), 2145–2164. <https://doi.org/10.1080/01496395.2022.2028836>
- [3] Golovanov, I. M., Seltmann, R., & Kremenetsky, A. A. (2005). The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: 2. The Almalyk (Kalmakyr–Dalnee) and Saukbulak Cu-Au porphyry systems, Uzbekistan. In *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective* (Vol. 2, pp. 513–523). PGC Publishing.
- [4] Katwika, C. N., Kime, M. B., Kalenga, P. N. M., Mbuya, B. I., & Mwilen, T. R. (2019). Application of Knelson concentrator for beneficiation of copper–cobalt ore tailings. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(1), 35–45.
- [5] Laplante, A. R., Woodcock, F., & Huang, L. (2000). A laboratory procedure to characterise gravity recoverable gold. *SME Transactions*, 308, 53–59.
- [6] Majumder, A. K., & Barnwal, J. P. (2006). Modeling of enhanced gravity concentrators—Present status. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 27(1), 61–86. <https://doi.org/10.1080/08827500500339307>
- [7] Marion, C., Langlois, R., Kokkiliç, O., Zhou, M., Williams, H., Awais, M., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2019). A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*, 135, 139–155.
- [8] Shakarov, T. I., & Xasanov, A. S. (2025). Foydali qazilmalarni boyitish va qayta ishlash asoslari: Oliy o'quv yurtlari uchun darslik. «Muharrir» nashriyoti.
- [9] Sidiqov, R. M., Ergashev, M. A., Axmadaliyev, A. M., & Abdurazakov, U. M. (2026). Polimetall rudalarini boyitishda kombinatsiyalashgan texnologiyaning samaradorligini tadqiq etish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(2), 61–66.
- [10] Surimbayev, B., Bolotova, L., Akcil, A., Yessengarayev, Y., & Khumarbekuly, Y. (2024). Gravity concentration of gold-bearing ores and processing of concentrates: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2395824>
- [11] Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [12] Хасанов, А. С., & Эргашев, М. А. (2023). Изучение золота в пробе руды месторождения «Ёшлик I». *Ijodkor o'qituvchi*, 3(33), 236–242.
- [13] Хасанов, А. С., Турдиев, Ш. Ш., Эргашев, М. А., & Махситалиева, Л. О. (2024a). Изучение вещественного состава руды, гранулометрический анализ месторождений «Кальмакыр» и «Ёшлик I». *Перспективы развития композиционных материалов: Республиканская научно-техническая конференция* (с. 170–171). Ташкент.
- [14] Хасанов, А. С., Турдиев, Ш. Ш., Эргашев, М. А., & Махситалиева, Л. О. (2024b). Изучение формы нахождения благородных металлов в рудах месторождения «Кальмакыр». *Перспективы развития композиционных материалов: Республиканская научно-техническая конференция* (с. 173–174). Ташкент.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Axmadaliyev, A. M., Ergashev, M. A., Larionov, S. V., & Sidiqov, R. M. (2026). Mis-porfir ma'danidan oltin va kumushni markazdan qochma konsentrator yordamida ajratib olishda G-omil va sikl vaqti ta'sirini faktorli tajriba asosida baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.24>
