



## Молибдены флотацид нөлөөлөх эргэлтийн усанд ууссан ионуудын концентрацийг математик загварчлалаар оновчлох боломж

Сүрэн Цээлэй<sup>1</sup>, Даваасамбуу Сарангэрэл<sup>2</sup>, Долгоржав Оюунцэцэг<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Эрдэнэтийн технологийн сургууль, Шинжлэх ухаан технологийн их сургууль, Орхон аймаг 61027, Монгол улс

<sup>2</sup>Химийн тэнхим, Шинжлэх ухааны сургууль, Монгол улсын их сургууль, Улаанбаатар 14200, Монгол улс

<sup>3</sup>Хүрээлэн буй орчны химийн лаборатори, Хими, химийн технологийн хүрээлэн, Шинжлэх ухааны академи, Улаанбаатар 13260, Монгол улс

\*E-mail: oyuntsetseg@mas.ac.mn

ORCID: [0000-0001-5278-1580](https://orcid.org/0000-0001-5278-1580)

Хүлээн авсан: 17.11.2025

Хяналтад: 18.11.2025

Хэвлэлтэд авсан: 15.12.2025

**Хураангуй:** Эргэлтийн усан хангамж бүхий зэс-молибдены хүдэр баяжуулах процесс молибдены ихээхэн алдагдалтай явагддаг бөгөөд металл авалт 50%-иас бараг хэтэрдэггүй. “Эрдэнэт үйлдвэр” ТӨҮГ-ын Баяжуулах үйлдвэрээс гарч буй маш их ус агуулсан хаягдал булингыг хаягдлын санд тунгаан, нэмэлт цэвэрлэгээгүйгээр эргүүлэн ашигладаг. Тунгаан цэвэрлэгдсэн энэ усыг эргэлтийн ус гэх ба 1 тонн хүдэр боловсруулахад 2.7 тонн ус ашигладаг. Хаягдлын сангийн ус нь ялангуяа хавар, зуны улиралд цас, мөс, хур тунадасны усаар сэлбэгдэх мөн аэробик орчны нөлөөгөөр органик үлдэгдлүүд исэлдэж, олон дахин эргэлтэд орсноор усны ионуудын агуулга нэмэгдэж байна. Түүнчлэн зэс, кальци, магни, төмөр, молибден, сульфат ионуудын ихээхэн хуримтлал үүсэх нь хүдрийн гадаргуугийн шинж чанарт нөлөөлдөг. Энэхүү судалгаагаар эргэлтийн усанд ууссан  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mo}^{4+}$  ионуудын агуулгын ихсэлт молибденитийн баяжигдах чанарт нөлөөлөх нөлөөллийг судлах, ионуудын концентрацийн харьцааг математик загварчлалаар оновчлох судалгааг хийсэн. Ион бүрийн концентрацийн ихсэлт молибденитийн баяжигдах чанарт дарагч нөлөө үзүүлэх байдлаар нь  $\text{Cu}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Mo}^{4+}$  гэж эрэмбэлж болохоор байна. Ууссан ионуудын концентрацийн харьцааг математик загварчлалаар оновчлох судалгаанд “Design Expert 13” программын математик төлөвлөлтийн Factorial Design аргыг ашигласан. Эргэлтийн усанд ууссан ионууд ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mo}^{4+}$ )-ын концентрацийн оновчтой харьцааг  $\text{Cu}^{2+}$ -0.12 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$ -250.0 мг/л,  $\text{Fe}^{3+}$ -2.0 мг/л,  $\text{Mo}^{4+}$ -1.2 мг/л мужид молибдены металл авалт хамгийн их буюу 57.81%, гарц 2.18% байх боломжтой гэж тодорхойлсон.

**Түлхүүр үг:** молибденит, баяжигдах чанар, дарагч ионууд, design of experiments

### ОРШИЛ

Хөвүүлэн баяжуулах процесс нь асар их хэмжээний ус ашиглаж үнэт эрдэс, хоосон чулуулгийн гадаргуугийн физик-химийн ялгаатай шинж чанарт тулгуурлан хүдэр баяжуулах арга юм. Цэвэр усны хомсдол, байгаль орчны бохирдлоос сэргийлэх, үйлдвэрлэлийн зардал бууруулах, технологийн тогтвортой ажиллагааг хангах үүднээс уул уурхайн үйлдвэрүүд хаягдал усаа эргүүлэн ашиглах шаардлагатай байдаг. Зэс-молибдены хүдэр баяжуулах процессын эргэлтийн усанд флотацийн урвалжийн үлдэгдэл, үндсэн металлын ионууд, сульфат, сульфид, хлорид, магни, кальци, натри, кали зэрэг элемент, ионууд агуулагдаж ууссан ионы хүч ихтэй, нийлмэл найрлагатай ус болдог [1-2]. Ийм нийлмэл найрлагатай усыг технологийн процесст ашиглахад ашигт малтмалын эрдсийн гадаргууг исэлдүүлэх, адсорбцлах, тунадасжуулах, хөөсний гарц, тогтворжилтыг бууруулах зэргээр флотацийн үр ашигт сөргөөр нөлөөлдөг байна [1, 3-7]. Зэс-молибдены сульфидын хүдрийн баяжуулалтын явцад эргэлтийн усанд агуулагдах хүнд металлын ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) [8] болон  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ионуудыг [7] ялангуяа молибдены металл авалтыг бууруулах нөлөөтэйг олон судалгаагаар тогтоосон байдаг. Тасалгааны

температурт, усан орчинд молибденитийн гадаргуу амархан исэлдэх боловч эрдсийн гүн рүү исэлдэлт бараг явагддаггүй [9]. Гэвч эрдэсжилт ихтэй, шүлтлэг орчинд ялангуяа  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  уусмалуудыг  $10^{-2}\text{M}$  хүртэл хэмжээгээр нэмэгдүүлэхэд  $\text{Ca}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})^+$  гидроксид ба  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  тунадас хэлбэрээр молибденитийн гадаргууд адсорбцлогдож гидрофиль чанарыг нэмэгдүүлснээр молибдены металл авалт 70%-40% хүртэл буурдаг [10] болохыг тогтоосон байдаг. Хүчиллэг орчинд [11] сульфид эрдсийн исэлдэлтийн эхний шатанд  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ионууд молибденитийн гадаргууг исэлдүүлж гадаргуу дээр  $\text{HMoO}_4^-$  үүсгэснээр эрдсийн гадаргуу сөргөөр цэнэглэгдэж, металлын ионууд эрдсийн гадаргуу руу шилжих ба эрдэс-хөөсний таталцлын хүч багасаж, гарцыг нэмэгдүүлдэг. Харин шүлтлэг орчинд  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ионууд нь  $\text{Ca}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})^+$  гидроксид болон  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -ын коллоид тунадас хэлбэрээр молибденитийн гадаргууд адсорбцлогдож  $\text{MoO}_4^{2-}$  тай химийн харилцан үйлчлэлд орж pH-г нэмэгдүүлснээр катионуудын концентраци ханасан утгадаа хүрч тунадасжиж эхэлдэг [12] гэж үзсэн байна. Мөн эргэлтийн усанд  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ионууд их хэмжээгээр агуулагдах нь шүлтлэг орчинд  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,

**Хүснэгт 1. Эргэлтийн усны химийн шинжилгээний дүн**

Дээжийн нэр	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sub>нийт</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cu	Mo,	Хуурай үлдэгдэл	pH	Хатуулаг, мг-экв/л
	мг/л												
Эргэлтийн ус	181.6	53.82	466.9	19.46	0.155	1775.4	73.2	-	0.071	0.79	2802	7.9	24.9

Fe(OH)<sub>3</sub> хэлбэрийн тунадас үүсгэх ба молибденитийн гадаргууд адсорбцлогдож, гидрофиль чанарыг нэмэгдүүлдэг [13] мөн Ca<sup>2+</sup> агуулга ихтэй усанд MoS<sub>2</sub>-ын гадаргуу исэлдэж MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup> үүсэхтэй зэрэгцэн CaMoO<sub>4</sub>-ийн бүрхүүл үүсгэж молибденитийн баяжигдах чанарыг бууруулдаг [14] болохыг судлан тодорхойлсон байна. Түүнчлэн хүдэр дэх молибдены агуулга бага (0.01-0.02%)-тай эргэлтийн усан хангамж бүхий зэс-молибдены баяжуулах үйлдвэрүүдэд молибдены металл авалт 50%-д бараг хүрдэггүй байна [15]. Энэ чиглэлийн судалгааны ажлууд ууссан ионууд эрдсийн гадаргуутай харилцан үйлчлэлцэх механизмыг судлахдаа уусмалын орчин, ионы концентрацийн ихсэлт, урвалжийн зарцуулалт эсвэл ион тус бүрийн нөлөөллийг зохиомол дээж эсвэл далай, тэнгисийн ус ашигласан байна. “Эрдэнэт үйлдвэр” ТӨҮГ-ын зэс-молибден баяжуулах үйлдвэрт ялангуяа хавар-зуны улиралд молибден баяжуулах процессын хэвийн үйл ажиллагаа удаан хугацаагаар доголдог. Энэ доголдлыг үйлдвэрлэл дээр орчны pH болон исэлдэх ангижрах потенциал, урвалжийн горимын тохируулга хийх замаар залруулж байгаа ч металл авалт тогтворжихгүй байна. Бид энэ удаагийн судалгаанд эргэлтийн усанд ууссан ионууд (Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Mo<sup>4+</sup>)-ын концентрацийн өөрчлөлт молибденитийн баяжигдах чанарт нөлөөлөх нөлөөллийг судлахын тулд эргэлтийн усаар флотацийн туршилтууд явуулсан. Молибдены металл авалт болон гарц хамгийн их байх тохиромжтой нөхцөлд эргэлтийн усны нийлмэл ионуудын концентрацийн харьцааг оновчлоход Design of Experiments статистик шинжилгээний Factorial Design аргыг ашигласан болно.

**СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ**

**Эргэлтийн ус:** “Эрдэнэт үйлдвэр” нь зэс-молибдены хүдрээс хам болон салгах баяжуулалтын аргаар зэсийн болон молибдены баяжмал үйлдвэрлэдэг. Жилд 35 сая.тн хүдэр боловсруулж 60 гаруй мянган шоо метр усыг технологийн усны зориулалтаар хэрэглэж байгаа бөгөөд үүний 85-90% орчмыг эргүүлэн ашиглаж байна. Хам флотацид хаягдлын аж ахуйн тунаалтын цөөрмөөс эргэлтийн ус, салгах флотацид Сэлэнгэ мөрнөөс цэвэр ус (техникийн ус) авч ашигладаг. 1 тн хүдэр боловсруулахад 2.7 м<sup>3</sup> эргэлтийн ус, 0.3 м<sup>3</sup> техникийн ус хэрэглэхээс гадна хүдрийн ил уурхайн шүүрлийн сангийн ус, Эрдэнэт хотын цэвэрлэх

байгууламжаас цэвэрлэгдэн гарч байгаа гаралтын усыг нэмэлтээр авч ашигладаг. Үйлдвэрлэлийн хам флотацид хэрэглэх усыг эргэлтийн буюу технологийн ус гэх ба хаягдлын аж ахуйн тунаалтын цөөрөмд булингга тунааж, нэмэлт цэвэрлэгээгүйгээр эргүүлэн авч хэрэглэдэг. Үйлдвэрлэлийн урт хугацаанд эргэлтийн усанд ууссан ионуудын агуулга ихэссэнээр хатуулаг, эрдэжилт нь байнга нэмэгдэж байна. Энэ удаагийн флотацийн туршилтад ашигласан эргэлтийн усны химийн найрлагын дундаж үзүүлэлтүүдийг “Эрдэнэт үйлдвэр-”ийн Чанарын хяналтын хэлтсийн химийн төв лабораторийн шинжилгээ болон Хими, химийн технологийн хүрээлэнгийн судалгааны ажлын тайлан [16]-д үндэслэсэн тооцоолсон болно (Хүснэгт 1).

**Хүдэр ба урвалж, бодис**

**Хүдэр:** Флотацийн туршилтад ашигласан хүдрийн дээжийг Баяжуулах үйлдвэрийн стандарт хүдэр (хүдэр 4)-ээс 60 кг төлөөлөх дээж авч, Эрдэнэт цогцолбор дээд сургуулийн Эрдэс боловсруулалтын лабораторид конусан холилтын аргаар хольж, -3 мм асгах завсрын зайтай Rocklabs хацарт бутлуураар буталж, бүхэллэгийн хэмжээг багасгасан. Туршилт судалгааны ажилд зориулж 1000 г + (10 г)-р 30 уут дээж болгон савлаж, дээж хадгалах зориулалтын хэсэгт хураасан. Туршилтад хэрэглэсэн хүдрийн дээжийн хүнд металлын химийн шинжилгээний дүнг Хүснэгт 2-т үзүүлэв.

**Хүснэгт 2. Анхдагч хүдэр дэх агуулга**

Хүдэр-4		
Cu	Mo	Fe
0.364%	0.015%	2.355%

Шинжилгээг Эрдэнэт үйлдвэрийн чанар хяналтын хэлтсийн химийн төв лабораторид хийлгэсэн болно. Зэсийн агуулгыг цахилгаан гравиметр ба иодометрийн титрлэлтээр “MNS 2071:1988”, молибдены агуулгыг фотоколориметрийн аргаар “MNS 2077:1984”, төмрийн агуулгыг титрметрийн аргаар “MNS 2078:1984” тус тус тодорхойлов. Булингийн pH=10.3-10.9 нөхцөлд CaO=0.9 г/т, тээрэмд BK901B=3 г/т, монфлот-03 = 6.5 г/т, үндсэн флотацид МИБК=18.5 г/т тус тус агуулгатай урвалжуудыг өгч флотацын туршилтыг явуулав. **Туршилтад хэрэглэсэн урвалж, бодис:** CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·9H<sub>2</sub>O, Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> зэрэг химийн цэвэр бодисуудаар тохирох концентраци бүхий уусмалуудыг бэлтгэн туршилтад ашиглав.

Хүснэгт 3. Эргэлтийн усанд ууссан ионуудын концентрацийн муж сонгох

№	Ионуудын концентрац, мг/л				Тайлбар
	Ca <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Mo <sup>4+</sup>	
1	125	0.25	0.06	0.25	4 дахин шингэрүүлсэн
2	250	0.5	0.12	0.50	2 дахин шингэрүүлсэн
3	550	1.0	0.25	1.00	эргэлтийн усанд агуулагдах дундаж концентраци
4	650	1.5	0.35	1.20	дундаж концентрацийг 1.2 дахин нэмэгдүүлсэн
5	750	2.0	0.45	1.40	нэмэгдүүлсэн концентрацийг 1.2 дахин нэмэгдүүлсэн

**Туршилт ба загварчлал**

**Флотацийн туршилт:** Лабораторийн туршилтыг үндсэн флотаци 2+3 минут, хяналтын флотаци 7 минутаар гурван баяжмалтайгаар гүйцэтгэв. Өмнөх судалгааны ажлын үр дүн [17] болон бусад судалгааны ажлын материалуудад үндэслэн [10, 19-21] эргэлтийн усанд ууссан ионуудаас молибдены металл авалтад хамгийн их нөлөөтэй Ca<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mo<sup>4+</sup> ионуудыг сонгож, концентрацийг 5 түвшнээр өөрчилж, бусад параметрууд тогтмол байхаар флотацийн туршилт явуулав. Туршилтад хэрэглэсэн эргэлтийн усны ионуудын концентрацийн дээд, доод утгыг шинжилгээний дүн (Хүснэгт 1)-д үндэслэн сонгож Хүснэгт 3-т үзүүлэв. Зэс-молибдены анхдагч хүдэр, баяжмал, хаягдалд молибдены агуулгыг MNS 2077:1984 Молибдены агуулгыг фотоколориметрийн аргаар тодорхойлох стандарт аргачлалын дагуу гүйцэтгэж комплекс нэгдлийн концентрацийг ашиглан молибдены агуулгыг дараах томъёогоор тооцоолсон.

$$Mo(\%) = \frac{C_T \cdot V_1 \cdot 100\%}{m \cdot V_2 \cdot 10^6} \quad (1)$$

Энд:

C<sub>T</sub>- туршилтаар гарсан уусмалын концентраци, мкг

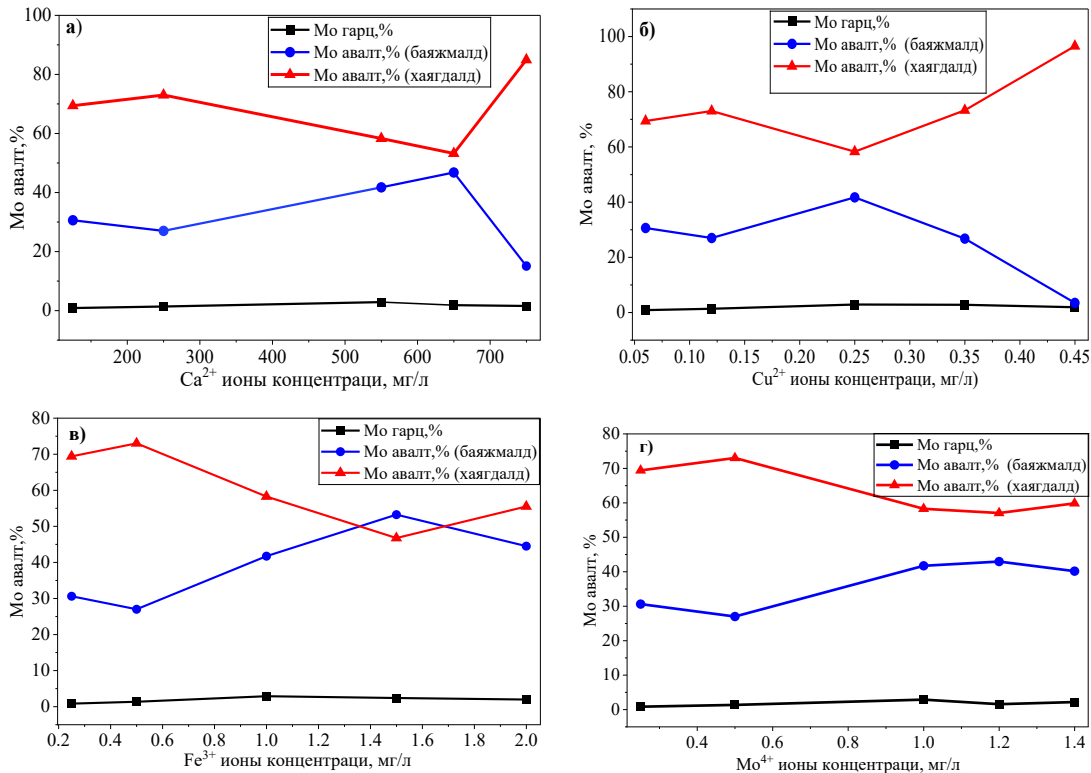
V<sub>1</sub>- дүүргэсэн хэмжээст колбоны эзлэхүүн, мл

V<sub>2</sub>- авсан аликвотны эзлэхүүн, мл

m - шинжилгээнд авсан дээжийн жин, г

**Математик загварчлал ба Factorial Design:**

Factorial Design анализ нь Design of Experiments (DOE)-ын нэг төрөл бөгөөд туршилтыг оновчтой төлөвлөх, олон хүчин зүйлсийн нөлөөг зэрэг судлах, статистик боловсруулалт хийх, оновчтой горим тогтооход ашигладаг статистик шинжилгээний арга юм [18]. Туршилтын нөхцөл хязгаартай, дотоод мужид төвлөрсөн бөгөөд туршилтын тоог багасгахад илүү тохиромжтой гэж үзэж хүчин зүйлийн дээд, доод түвшин (2-level factorial)-ээр туршилтын матриц төлөвлөх 1/2 Fraction design (хагас фактор загвар)-ыг энэ удаагийн судалгаанд ашигласан. k хүчин зүйлтэй бүтэн фактор (Full factorial) загварт нийт туршилтын тоо N=2<sup>k</sup>, харин 1/2 Fraction factorial загварт N = 2<sup>k-1</sup> тооны туршилт төлөвлөгдөж, регрессийн шугаман тэгшитгэл дараах хэлбэрээр бичигдэнэ [22-24].



Зураг 1. А) Ca<sup>2+</sup> ионы концентраци; Б) Cu<sup>2+</sup> ионы концентраци; В) Fe<sup>3+</sup> ионы концентраци; Г) Mo<sup>4+</sup> ионы концентраци молибдены гарц болон металл авалтад нөлөөлөх нөлөөлөл

$$y = \beta_0 + \beta_i x_i + \beta_j x_j + \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \varepsilon \quad (1)$$

Үүнд:

$y$  - урьдчилан таамагласан үр дүн,  $\beta_0$  - сул гишүүн,  $\beta_i, \beta_j, \beta_{ij}$  - хүчин зүйлсийн нөлөөг илэрхийлэх регрессийн коэффициент,  $x_i, x_j$  - хүчин зүйлсийн кодлосон утгууд (-1, +1),  $x_i x_j$  - 2 хүчин зүйлийн харилцан үйлчлэлийн кодлосон утгууд,  $\varepsilon$  - санамсаргүй алдаа

#### ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

##### ***Ca<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mo<sup>4+</sup>* ионуудын концентраци молибдены металл авалтад нөлөөлөх нөлөөлөл:**

Эргэлтийн усанд ууссан дээрх ионуудын концентрацийн өөрчлөлт молибдены металл авалт болон гарцад үзүүлэх нөлөөллийг судалсан үр дүнг *Зураг 1*-т үзүүлэв. Энэ зургаас харахад  $Ca^{2+}$  ионы концентраци 550-650 мг/л байхад гарц 2.87-1.81%, молибден авалт хамгийн их буюу 41-46% байснаа 650-750 мг/л хүртэл нэмэгдүүлэхэд гарц 1.54%, металл авалт баяжмалд 15.07% (31%-иар буурсан), хаягдалд 84.93% агуулгатай тодорхойлогдож байна. Шүтлэг орчинд (булингын рН=10.3-10.7) усанд ууссан  $Ca^{2+}$  ионы агуулга ихсэхэд  $Ca(OH)^+$  хэлбэрийн гидроксид болон коллоид тунадас хэлбэрээр молибденитийн гадаргууд адсорбцлогдох [10, 13],  $MoS_2$ -ын гадаргуу исэлдэж  $MoO_4^{2-}$  үүсэхтэй зэрэгцэн  $CaMoO_4$ -ийн бүрхүүл үүсгэж молибденитийн баяжигдах чанарыг бууруулдаг [14] зүй тогтолтой холбоотой байж болох юм. *Зураг 1б*-д  $Cu^{2+}$  ионы концентраци 0.12-0.25 мг/л-т гарц 1.35-2.81%, металл авалт хамгийн их буюу 26.99-41.73% байсан концентрацийг 0.25-0.35 мг/л хүртэл нэмэгдүүлэхэд гарц 2.81-2.79%, металл авалт 41.73-26.75% (14.98%-иар буурсан) болсон бол концентрацийг 0.35-0.450 мг/л хүртэл нэмэгдүүлэхэд гарц 2.79-1.9% (0.89%-иар буурсан), металл авалт баяжмалд 26.75-3.45% (23.3%-иар буурсан), хаягдалд 96.55% агуулгатай болсон нь  $Cu^{2+}$  ионы концентрацийн ихсэлт молибденитийн баяжигдах чанарт хүчтэй дарагч нөлөө үзүүлж байна. Энэ процессыг эргэлтийн усанд ууссан  $Cu^{2+}$  ионы агуулга ихсэх нь [15] шүтлэг орчинд  $MoS_2$  гадаргуу дээр гидроксид комплекс хэлбэрээр адсорбцлогдож, з-потенциалийг нэмэгдүүлж, молибденитийн баяжигдах чанарыг дарангуйлдаг [4, 8] зүй тогтолтой холбоотой гэж үзэж байна. *Зураг 1в*

-д  $Fe^{3+}$  ионы концентраци 1.0-1.5 мг/л-т гарц 2.87-2.38%, металл авалт хамгийн их буюу 41.73-53.25% байснаа концентрацийг 1.5-2.0 мг/л хүртэл нэмэгдүүлэхэд гарц 3.46%, металл авалт 53.25-44.5% (8.75% иар буурсан) байна. Усанд ууссан  $Fe^{3+}$  ионы концентраци ихсэхэд  $Fe(OH)_3$  тунадас хэлбэрээр молибденитийн гадаргууг бүрхэж гидрофиль шинжтэй болгосноор баяжигдах чанарыг бууруулна [4, 8] гэсэн судалгааны ажлуудын дүгнэлттэй ижил дүгнэлтэд хүрч байна. *Зураг 1г*-д  $Mo^{4+}$  ионы концентраци 1.0-1.2 мг/л мужид гарц 2.81-1.57%, металл авалт хамгийн их буюу 41.72-42.96%, концентрацийг 1.2-1.4 мг/л хүртэл нэмэгдүүлэхэд гарц 2.18%, металл авалт 40.16% (2.8%-иар буурсан) болсон байна. Шүтлэг орчинд молибденит ( $MoS_2$ )-ын гадаргуу хэсэгчлэн исэлдсэн үед  $MoO_4^{2-}$  гэсэн хамгийн тогтвортой хэлбэрээр орших ба энэ нь  $Ca^{2+}, Mg^{2+}$  зэрэг катионуудтай урвалд орж  $CaMoO_4$  хэлбэрийн гидрофиль бүрхүүл үүсгэж молибденитын баяжигдах чанарт сөргөөр нөлөөлдөг [14] механизмтай холбоотой металл авалт буурсан гэж үзэж байна. Эргэлтийн усанд ууссан ионуудын концентраци нэмэгдэхэд гарц болон баяжмалд металл авалт огцом буурч, хаягдалд металлын агуулга эрс өссөн нийтлэг зүй тогтол ажиглагдаж байна. Ууссан ионуудын концентрацийн ихсэлт молибдены металл авалтад сөрөг нөлөө үзүүлэх дарааллаар эрэмбэлвэл:  $Cu^{2+} > Ca^{2+} > Fe^{3+} > Mo^{4+}$  байна.

**Factorial design анализ:** Флотацийн туршилтын дээрх дүнгээс эргэлтийн усанд ууссан ионууд ( $Ca^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{3+}, Mo^{4+}$ )-ын харилцан үйлчлэлийн концентрацийн оновчтой харьцааг тогтоохын тулд хүчин зүйл бүрийн нөлөөллийг тусад нь судалсан судалгаа (*Зураг 1*)-д үндэслэн олон хүчин зүйлээс чухал хүчин зүйлс болон тэдгээрийн хоорондын харилцан хамаарлыг цөөн туршилтаар илрүүлэх хагас фактор ( $\frac{1}{2}$  Fraction) загвар сонгож, туршилтыг төлөвлөсөн. Хүчин зүйлийн тоо 4 байх үед хагас фактор туршилтын загвараар  $N = 2^{k-1}$  буюу 8, бүтэн фактор загвараар  $N = 2^k$  буюу 16 туршилт төлөвлөгдөнө [22]. Сонгосон загвараар флотацийн туршилт явуулахад металл авалт хамгийн их байгаа нөхцөл (5-р туршилт)-ийг баталгаажуулах үүднээс 9, 10 дугаар туршилтыг давтан явуулж, үр дүнгийн хамт *Хүснэгт 4*-т харуулав.

**Хүснэгт 4.** Туршилтын загвар ба үр дүн

№	A:Ca <sup>2+</sup> , мг/л	B:Cu <sup>2+</sup> , мг/л	C:Mo <sup>4+</sup> , мг/л	D:Fe <sup>3+</sup> , мг/л	Гарц, %	Металл авалт, %
1	250	0.12	0.50	0.5	1.65	36.99
2	650	0.12	0.50	2	1.94	37.06
3	250	0.45	0.50	2	1.68	38.4
4	650	0.45	0.50	0.5	1.86	28.03
5	250	0.12	1.20	2	2.38	56.73
6	650	0.12	1.20	0.5	2.04	39.1
7	250	0.45	1.20	0.5	1.97	40.05
8	650	0.45	1.20	2	1.89	30.05
9	250	0.12	1.20	2	2.03	54.84
10	250	0.12	1.20	2	2.27	57.29

**Хүснэгт 5.** Хувьсагчдын статистик шинжилгээний дүн (молибдены металл авалт)

№	Хүчин зүйлс	Чөлөөний зэрэг	Квадрат нийлбэр	Дундаж квадрат	F-утга	P-утга
1	Ca <sup>2+</sup>	1	228.31	228.30	303.572	<0.0001
2	Cu <sup>2+</sup>	1	180.43	180.42	239.897	<0.0001
3	Mo <sup>4+</sup>	1	59.29	59.29	78.835	0.00301
4	Fe <sup>3+</sup>	1	41.01	41.01	54.523	0.00514
5	Ca*Cu	1	45.21	45.20	60.101	0.00446
6	Ca*Mo	1	49.17	49.17	65.383	0.00395

**Статистик шинжилгээ:** Уг загварын статистик боловсруулалтын үр дүнд P ба F-утга, регрессийн коэффициент (R<sup>2</sup>) зэрэг ANOVA шинжилгээний параметруудийн үнэлгээгээр молибдены металл авалт (Хүснэгт 5), молибдены гарц (Хүснэгт 7)-д дүн шинжилгээ хийлээ.

Дээрх статистик шинжилгээний дүн Хүснэгт 5-с Ca<sup>2+</sup> ионы F утга хамгийн их буюу 303.572 байгаа нь эргэлтийн усанд ууссан нийлмэл ионуудтай харилцан үйлчлэлийн хувьд Ca<sup>2+</sup> ион илүү нөлөөтэй байгааг харуулж байна. Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mo<sup>4+</sup>, Ca\*Cu, Ca\*Mo хувьд P<0.05 буюу ач холбогдолтой гэж үнэлж байна. Молибдены металл авалтын статистик үр нөлөөг үнэлэх шалгуурыг тооцоолсон дүнг Хүснэгт 6-д үзүүлэв.

**Хүснэгт 6.** Статистик шалгуурууд (молибдены металл авалт)

Ст.хазайлт	0.86
R <sup>2</sup>	0.99
Таамагласан R <sup>2</sup>	0.87
Бодит R <sup>2</sup>	0.99
RSS	2.26

Туршилтын стандарт хазайлт 0.86 зөвшөөрөгдөх мужид байгаа бол үлдэгдлийн квадратуудын нийлбэр (RSS) бага буюу 2.26 байгаа нь загвар тохиромжтой байгааг илэрхийлж байна. Түүнчлэн ANOVA шинжилгээнд R<sup>2</sup>=99.65 нь нийт хүчин зүйлсийн өөрчлөлтийн 99.65%-ийг уг загвараар тайлбарлах боломжтойг харуулж байна. Урьдчилан таамагласан R<sup>2</sup>=87.04 байна.

Хүснэгт 7-с Mo<sup>4+</sup> ионы F утга хамгийн их буюу 72.641 байгаа нь эргэлтийн усанд ууссан бусад ионуудтай харьцуулахад энэ ионы концентраци молибдены гарцад эерэг нөлөөтэй болохыг харуулж байна. Флотацийн агааржуулалттай системд (pH≈10.3-10.8) исэлдүүлэгч орчинд усанд ууссан молибдены хамгийн тогтвортой байх хэлбэр нь молибдат (MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ион байна. Илүүдэл молибдат ионууд флотацийн сонгомол ялгаралтыг сайжруулах, эрдэс дэх молибдений тархалтыг

**Хүснэгт 7.** Хувьсагчдын статистик шинжилгээний дүн (молибдены гарц)

№	Хүчин зүйлс	Чөлөөний зэрэг	Квадрат нийлбэр	Дундаж квадрат	F-утга	P-утга
1	Ca <sup>2+</sup>	1	1.36E-4	1.36E-4	0.037	0.864
2	Cu <sup>2+</sup>	1	0.063	0.063	17.499	0.0526
3	Mo <sup>4+</sup>	1	0.26	0.26	72.641	0.0135
4	Fe <sup>3+</sup>	1	0.02	0.02	6.731	0.1219
5	Ca*Cu	1	0.01	0.01	2.474	0.2565
6	Ca*Mo	1	0.08	0.081	23.029	0.0408
7	Ca*Fe	1	0.05	0.046	13.661	0.0661

**Хүснэгт 8.** Статистик шалгуурууд (молибдены гарц)

Ст.хазайлт	0.61
R <sup>2</sup>	0.99
Таамагласан R <sup>2</sup>	0.94
RSS	0.01

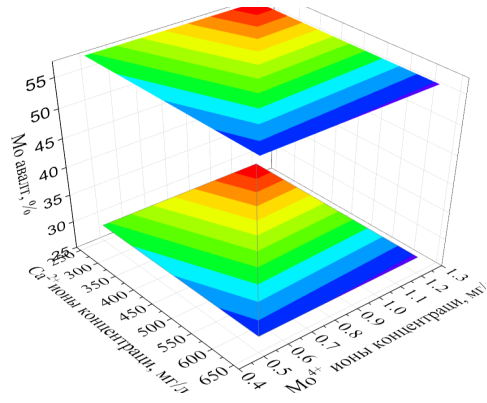
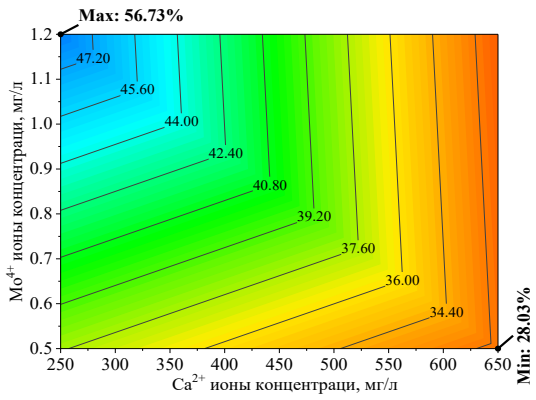
нэмэгдүүлэх нь баяжмалын гарцад эерэг нөлөө үзүүлэх боломжтой [31-32]. Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> болон Ca\*Cu, Ca\*Fe хувьд P>0.05 буюу ач холбогдолгүй, Mo<sup>4+</sup> ба Ca\*Mo хувьд P<0.05 буюу нөлөөтэй болохыг харуулж байна. Молибдены гарцын статистик үр нөлөөг үнэлэх шалгуурын үр дүнг Хүснэгт 8-д үзүүлэв. Туршилтын стандарт хазайлт 0.61 зөвшөөрөгдөх мужид байгаа бол үлдэгдлийн квадратуудын нийлбэр (RSS) бага буюу 0.01 байгаа нь загвар тохиромжтой байгааг илэрхийлж байна. Түүнчлэн ANOVA шинжилгээнд R<sup>2</sup>=99.54 нь нийт хүчин зүйлсийн өөрчлөлтийн 99.54%-ийг уг загвараар тайлбарлах боломжтойг харуулж байна. Урьдчилан таамагласан R<sup>2</sup>=93.43 байна. Эдгээр статистик шинжилгээнд үндэслэн молибдены металл авалт болон гарцад эргэлтийн усанд ууссан ионуудын нөлөөллийг тодорхойлох кодчилсон регрессийн тэгшитгэлийг дараах хэлбэрээр бичиж болно.

$$\text{Mo авалт, \%} = 38.21 - 4.84A - 4.27B + 3.08C + 2.15D - 2.27AB - 2.36AC \quad (3)$$

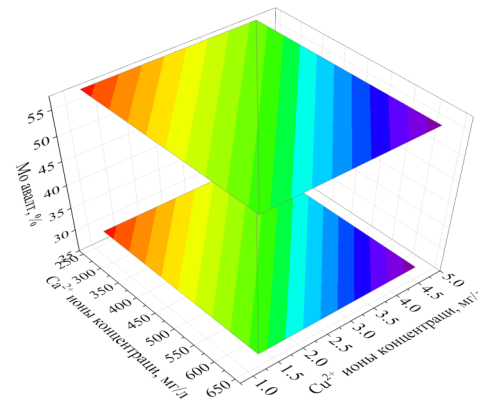
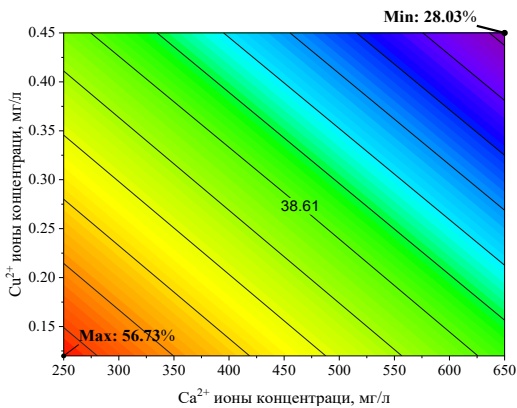
$$\text{Mo гарц, \%} = 0.019 + 1.66A - 0.088B + 0.18C + 0.059D + 0.032AB - \quad (5)$$

Үүнд: A-Ca<sup>2+</sup>, B-Cu<sup>2+</sup>, C-Mo<sup>4+</sup>, D-Fe<sup>3+</sup>, AB-Ca<sup>2+</sup>\*Cu<sup>2+</sup>, AC-Ca<sup>2+</sup>\*Mo<sup>4+</sup>, AD-Ca<sup>2+</sup>\*Fe<sup>3+</sup>

Регрессийн тэгшитгэл (3)-с молибдены металл авалтад A, B хүчин зүйлс сөрөг нөлөөтэй бол C, D хүчин зүйлс дангаараа эерэг нөлөөтэй харагдаж байгаа ч харилцан хамаарлын нөлөөгөөр AB, AC сөрөг нөлөөтэй байна. Харин A ба D хүчин зүйлс харилцан хамаарлын нөлөөгөөр бусад хүчин зүйлтэй харьцуулахад статистикийн хувьд ач



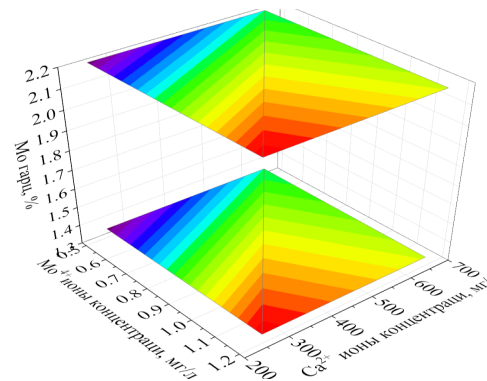
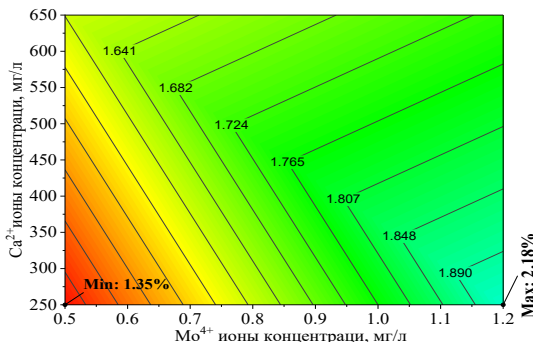
Зураг 2а.  $Ca^{2+} * Mo^{4+}$  ионы концентраци ба молибдены металл авалтын хамаарлын 2D, 3D муруй



Зураг 2б.  $Ca^{2+} * Cu^{2+}$  ионы концентраци ба молибдены металл авалтын хамаарлын 2D, 3D муруй

холбогдол багатай буюу туршилтын загвар сонголттой холбоотойгоор өөр харилцан хамааралтай хүчин зүйлстэй давхцсан (aliased) байна. Эдгээр харилцан хамааралтай хүчин зүйлсийн молибдены металл авалтад үзүүлэх нөлөөллийг гадаргуугийн 2D болон 3D муруйгаар Зураг 2-т харуулав. Зураг 2а-с  $Ca^{2+} * Mo^{4+}$  гэсэн хос ионуудын харилцан үйлчлэл ялангуяа  $Ca^{2+}$  ионы ихсэлт молибдены металл авалтад сөрөг нөлөөтэй болох нь харагдаж байна. Шүтлэг орчинд  $Ca^{2+}$  агуулга ихтэй усанд  $MoS_2$ -ын гадаргуу исэлдэж  $MoO_4^{2-}$  үүсэхтэй зэрэгцэн  $CaMoO_4$ -ийн бүрхүүл үүсгэж молибденитийн баяжигдах чанарыг бууруулдаг [14]-тай холбоотой байж болох юм. Зураг 2б-с  $Ca^{2+} * Cu^{2+}$  хос ионуудын концентрацийн ихсэлт молибдены металл авалтад илүү сөрөг

нөлөөтэй болох нь харагдаж байна. Үүнийг шүтлэг орчинд  $Cu^{2+}$  нь молибденитийн гадаргууд  $Cu(OH)_2$  хэлбэрийн бүрхүүл үүсгэн адсорбцлогдож, гидрофоб чанарыг бууруулдаг [8]-тай холбон тайлбарлаж болох юм. Харин баяжмалын гарц үзүүлэлтийн регрессийн тэгшитгэл (4)-ийн коэффициентийн хувьд С хүчин зүйл буюу  $Mo^{4+}$ , АС буюу  $Ca * Mo$  харилцан үйлчлэлийн  $P < 0.05$  баяжмалын гарцад эерэг нөлөөтэй байна. Баяжмалын гарцад нөлөө бүхий хүчин зүйлсийн хамаарлыг гадаргуугийн 2D болон 3D муруйгаар Зураг 3-т харуулав. Зураг 3-с молибдены гарц үзүүлэлтэд усанд уссан ионуудаас  $Mo^{4+}$  эерэг,  $Ca^{2+}$  сөрөг хамааралтай байна. Энэ зүй тогтлыг хувьсагчдын статистик шинжилгээний дүн Хүснэгт 7-д тайлбарласан.



Зураг 3.  $Ca^{2+} * Mo^{4+}$  ионы концентраци ба молибдены гарцын хамаарлын 2D ба 3D муруй

**Хүснэгт 9.** Эргэлтийн усанд агуулагдах ионуудын оновчтой нөхцөл

Ca <sup>2+</sup> , мг/л	Cu <sup>2+</sup> , мг/л	Mo <sup>4+</sup> , мг/л	Fe <sup>3+</sup> , мг/л	Мо авалт, %	Мо гарц, %	Мо авалт ба Мо гарц үзүүлэлтийн хүрэх үр дүн, %
250	0.12	1.2	2.0	57.18	2.18	100

**Оновчлол:** Factorial Design анализын ½ Factorial загвараар туршилтын үр дүнгүүдийг үнэлсэн статистик шалгуурт үндэслэн эргэлтийн усанд ууссан ионуудын концентраци молибдены металл авалт болон гарцад нөлөөлөх оновчтой харьцааг санал болгосон нөхцөлүүдийг Хүснэгт 9-д харуулав. Санал болгосон оновчтой нөхцөлийг ашиглан 2 удаагийн давтамжит туршилт явуулахад молибдены металл авалт дунджаар 56.29%, гарц 2.23% байгааг тодорхойлов.

**ДҮГНЭЛТ**

1. Энэ удаагийн флотацийн туршилтад эргэлтийн усанд ууссан ионуудын концентраци молибдены металл авалт болон гарцад үзүүлэх нөлөөг ион тус бүрийн концентрацийг 5 түвшинд өөрчлөн судалсан. Эргэлтийн усанд ууссан ионуудын концентрацийн ихсэлт молибдены металл авалтад дарагч нөлөө үзүүлэх байдлаар нь эрэмбэлвэл Cu<sup>2+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Fe<sup>3+</sup>>Mo<sup>4+</sup> дараалалтай байна.
2. Эргэлтийн усанд ууссан нийлмэл ионуудын концентрацийн оновчтой харьцааг тодорхойлохын тулд Design of Experiments статистик шинжилгээний Factorial Design аргын ½ Factorial загвараар 4 хүчин зүйлийн хамаарлыг судалж, загварчлалаар оновчтой нөхцөлийг тогтоов. Статистик шинжилгээний энэ аргачлалыг олон хүчин зүйлийн туршилтын матриц төлөвлөх, тэдгээрийн харилцан хамаарлыг илрүүлэх, статистик боловсруулалт хийх, оновчтой горим тогтоох чиглэлээр флотацийн үр ашгийг нэмэгдүүлэхэд ашиглах боломжтой болохыг тогтоов.
3. Санал болгосон оновчтой нөхцөлөөр 2 удаагийн давтамжит туршилт явуулахад молибдены металл авалт дунджаар 56.29%, гарц 2.23% байсан бөгөөд технологийн усны горимыг энэ оновчтой харьцаагаар тохируулбал молибдены металл авалт 50%-иас дээш гарах боломжтой болохыг тодорхойлов.
4. Эргэлтийн усанд ууссан Cu<sup>2+</sup>, Mo<sup>4+</sup>, Fe<sup>3+</sup> зэрэг ионуудын агуулгыг багасгах нь флотацийн үр ашгийг нэмэгдүүлэхээс гадна үнэт бүрэлдэхүүнийг ялган авах, хаягдлын сангийн шүүрлийн усаар дамжин гүний болон гадаргын усанд нийлүүлэгдэх хүнд металлын агуулгыг бууруулах олон талын ач холбогдолтой.

**АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ**

1. T. Hirajima, G.P. W. Suyantara, O. Ichikawa, A.M. Elmahdy, H. Miki, K. Sasaki. (2016) Effect of Mg<sup>2+</sup>

- and Ca<sup>2+</sup> as divalent seawater cations on the floatability of molybdenite and chalcopyrite. *Miner. Eng.*, 96-97, p.83-93. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.023>
2. K.C. Corin, A. Charamba, M.S. Manono. (2024) Water quality impact on flotation response: A focus on specific ions and temperature. *Miner. Eng.*, 207, p.108549. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108549>
  3. J. Ornelas Tabares, I. Madrid Ortega, J. L. Reyes Bahena, A. A. Sánchez López, et al. (2006) Surface properties a floatability of molybdenite. *Proceedings of 2006 China-Mexico Workshop on Minerals Particle Technology, San Luis Potosí, Mexico*, p.115-124.
  4. G. Yi, E. Macha, J. Van Dyke, R. Ed Macha, T. McKay, M.L. Free. (2021) Recent progress on research of molybdenite flotation: A review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 295, p.102466. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102466>
  5. A. Bahrami, R. Hassanpour Kashani, F. Kazemi, Y. Ghorbani. (2022) Oxidation-reduction effects in the flotation of copper sulfide minerals and molybdenite - A proof of concept at industrial scale. *Miner. Eng.*, 180, p.107505. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107505>
  6. O. Bicak, Y. Ozturk, E. Ozdemir, Z. Ekmekci. (2018) Modelling effects of dissolved ions in process water on flotation performance. *Miner. Eng.*, 128, p.84-91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.031>
  7. S. Castro. (2018) Physico-chemical factors in flotation of Cu-Mo-Fe ores with seawater: A critical review. *Physicochem. Prob. Miner. Process.*, 54(4), p.1223-1236. <https://doi.org/10.5277/ppmp18162>
  8. B. Yang, D. Wang, T. Wang, H. Zhang, F. Jia, S. Song. (2019) Effect of Cu<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> on the depression of molybdenite in flotation. *Miner. Eng.*, 130, p.101-109. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.012>
  9. S. Castro, A. Lopez-Valdivieso, J.S. Laskowski. (2016) Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability. *Int. J. Miner. Process.*, 148, p.48-58. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.003>
  10. W. Li, Y. Li, Z. Wei, Q. Xiao, S. Song. (2018) Fundamental studies of sodium hexametaphosphate (SHMP) in reducing negative effects of divalent ions on molybdenite flotation. *Minerals*, 8(9), p.404. <https://doi.org/10.3390/min8090404>
  11. Y. Li, C. Lartey, S. Song, Y. Li, A.R. Gerson. (2018) The fundamental roles of monovalent and

- divalent cations with sulfates on molybdenite flotation in the absence of flotation reagents. *RSC Adv.*, 8(41), p.23364-23371. <https://doi.org/10.1039/C8RA02690D>
12. Z. Lu, J. Ralston, Q. Liu. (2020) "Face or Edge? Control of molybdenite surface interactions with divalent cations, *J. Physical Chem. C.*, 124(1), p.372–381. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07632>
  13. E. Wang, H. Wan, J. Qu, P. Yi, X. Bu. (2017) Inhibiting mechanism of high pH on molybdenite flotation. An experimental and DFT study. *Minerals*, 14(7), p.663. <https://doi.org/10.3390/min14070663>
  14. H. Wan, W. Yang, W. Cao, T. He, *et al.* (2017) The interaction between Ca<sup>2+</sup> and molybdenite edges and its effect on molybdenum flotation. *Minerals*, 7(8). <https://doi.org/10.3390/min7080141>
  15. I.V. Pestryak, V.V. Morozov, A. Batmunkh, E. Ochir. (2019) Analysis of the reasons for molybdenite losses and improvement of recirculating water conditioning regimes in the process of copper-molybdenum ore flotation. *Non-ferrous Metals*, 47(2), p.9-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2019.02.02>
  16. Баяжуулах үйлдвэрийн хаягдлын сангийн, эргэлтийн болон шүүрлийн усны найрлага, шинж чанарын динамик өөрчлөлтийг тодорхойлох судалгаа, *судалгааны тайлан, ШУА-ийн Хими, химийн технологийн хүрээлэн, 2025.*
  17. S. Tseelei, G. Odontuya, D. Uyanga, O. Khureldavaa, A. Ichinnorov, D. Sarangerel, D. Oyuntsetseg. (2025) Modeling the impact of recirculating water on molybdenum flotation. International 4th Conference on *Applied Sciences and Engineering, (ICASE 2025), Ulaanbaatar, Mongolia*, p.58
  18. B. Smucker, M. Krzywinski, N. Altman. (2019) Two level factorial experiments. *Nat. Methods*, 16 (3), p.211-212. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0335-9>
  19. M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, L.A. Escalera. (2008) Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta.*, 76(5), p.965-977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
  20. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9126236&fileId=9126237R>.
  21. R. Leardi. (2013). Chapter 2-Experimental design. Book series: *Data Handling in Science and Technology*, 28, p.9-53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59528-7.00002-8>
  22. D.C. Montgomery. (2000) Introduction to factorial design. 8th Ed., Arizona state university, John Wiley & Sons Inc, p.183-225. ISBN 978-1-118-14692-7
  23. H. Urbanietz, *et al.* (2020) Effect of molybdate ions on selective flotation of chalcopyrite and molybdenite.
  24. А.С. Королев. (2018) Влияние ионов молибдата на селективность флотации медно-молибденовых руд.

## The possibility of optimizing the concentrations of dissolved ions in the recirculated process water affecting molybdenum flotation through mathematical modeling

Tseelei Suren<sup>1</sup>, Sarangerel Davaasambuu<sup>2</sup>, Oyuntsetseg Dolgorjav<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Erdenet Institute of Technology, Mongolian University of Science and Technology, Orkhon 61027, Mongolia

<sup>2</sup>Department of Chemistry, School of Arts and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 14200, Mongolia

<sup>3</sup>Laboratory of Environmental Chemistry, Institute of Chemistry and Chemical Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13260, Mongolia

\*E-mail: oyuntsetsegd@mas.ac.mn

ORCID: [0000-0001-5278-1580](https://orcid.org/0000-0001-5278-1580)

Submitted: 17.11.2025

Reviewed: 18.11.2025

Accepted: 15.12.2025

**Abstract:** Molybdenum recovery from copper-molybdenum flotation process that uses recirculating water is challenging, and rarely reaches 50%. The Erdenet mining company reuses the recirculating water generated from the settling tank of waste sludge pond, with the amount of approximately 2.7 m<sup>3</sup> of water per ton of ore flotation. The water in the tailing pond is replenished by snow and ice melt, and precipitation, especially during the spring and summer seasons. In addition, due to aerobic conditions, organic residues undergo oxidation, and through repeated recirculation, the concentration of dissolved ions increases. As well as, the accumulation of copper, molybdenum, calcium, magnesium and iron affects the surface properties of the ore. This work aimed to study the effect of dissolved ions in recirculating water on the molybdenite flotation and to identify the optimized concentrations of the ions through mathematical modeling. The increase in the concentration of each ion appears to have a depressing effect on the floatability of molybdenite in the order of Cu<sup>2+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Fe<sup>3+</sup> > Mo<sup>4+</sup>. The optimization was conducted by using factorial design using Design-Expert software (version 13). The optimized concentrations of Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Mo<sup>4+</sup> were estimated to be 250.0, 2.0, 0.12 and 1.2 mg/L, respectively. These conditions resulted in the highest molybdenum metal recovery of 57.81% and a yield of 2.18%. This study proposes optimal dissolved ion conditions in recirculating water that can significantly improve molybdenum recovery.

**Keywords:** molybdenite, floatability, depression effect, dissolved ions, design of experiments

© The Author(s). 2025 **Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

<https://doi.org/10.5564/bicct.v13i13.5219>