

ОНОВЧЛОЛЫН АРГААР БАЯЖМАЛ ДАХЬ ЗЭСИЙН АГУУЛГА БА МЕТАЛЛ АВАЛТЫГ ТООЦОХ НЬ

О.Баттогтох*, Ц.Туяа, Р.Энхбат*****

Хураангуй: Энэхүү өгүүлэлд Эрдэнэт үйлдвэр ХХК-ийн 2009-2015 оны флотацийн процессын өгөгдлүүдэд статистик боловсруулалт гүйцэтгэн, зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулга, хам баяжмал дахь зэсийн металл авалтыг максимумчлах бодлогын математик загварыг байгуулан оновчлолын аргаар шийдсэн болно.

Түлхүүр үг: уул уурхай, эрдэс, процесс, функц, оновчлол, үр ашиг.

Оршил

Зэсийн баяжмалыг ерөнхийдөө зэс порфирын ордуудын хүдрийг флотацийн аргаар боловсруулан гаргаж байна. Баяжуулалтын флотацийн арга нь олон төрлийн ашигт малтмалыг боловсруулахад түгээмэл хэрэглэгддэг бөгөөд үндсэн аргуудын нэг юм. Өнгөт ба ховор, үнэт, холимог металлын 95 орчим хувийг баяжуулахад флотацийн аргыг хэрэглэдэг. Баяжуулалтын флотацийн аргын ач холбогдол байнга өсөн нэмэгдэж байгаа нь орчин үед ядуу агуулгатай, жигд биш нарийн шигтгээлэг, хэцүү баяжигддаг хүдэр ба нүүрсийг ихээр баяжуулах болсонтой холбоотой. Мөн бусад аргуудаар баяжуулах боломжгүй эрдэс түүхий эдийн иж бүрэн ашиглалтын агуулгыг шийдвэрлэх боломжтойгоос гадна флотацийн аргыг аж үйлдвэрийн бусад салбаруудад (гидро ба пирометаллурги, хими, барилгын үйлдвэрлэл, геологи, биологи, эрүүл мэнд, хөдөө аж ахуй) янз бүрийн бүтээгдэхүүнүүдийг ялган хуваах, хүрээлэн буй орчны асуудлуудыг шийдвэрлэхэд ашиглаж байна.

Монгол орон эрдэс баялагийн нөөц арвинтай тул флотацийн аргыг өргөн ашиглах шаардлагатай. Манай оронд 80 гаруй төрлийн ашигт малтмалын 1170 гаруй орд, 8000 гаруй илрэл бүртгэгдсэн ба эрдэс баялгийн салбарт өнөөгийн байдлаар хайгуулын 2079, ашиглалтын 1504, нийт 3583 тусгай зөвшөөрөл олгогдсон зэргээс үзэхэд уул уурхайн үйлдвэрлэл цаашид хөгжих асар их

* Эрдэнэт үйлдвэрийн Чанар хяналтын хэлтсийн технологич инженер (E-mail) Otgoibattogtokh@yahoo.com

** Эрдэнэт үйлдвэрийн Судалгааны төвийн зөвлөх (E-mail) res_lab@erdenetmc.mn

*** МУИС-ийн, Бизнесийн сургууль, (E-mail) renkhbat46@yahoo.com

нөөц, боломж байгааг харуулж байна. Монгол улсын уул уурхайн салбар нь дотоодын нийт бүтээгдэхүүний 17,1%, аж үйлдвэрийн нийт бүтээгдэхүүний 67,1%-ийг үйлдвэрлэдэг нийгэм эдийн засгийн хөгжлийн тулгуур салбарын нэг бөгөөд цаашид ч энэ байр суурь нь хадгалагдан хөгжих хандлага хэвээр байна. Зэсийн хүдэр баяжуулалтын процесс нь нэн түрүүнд эцсийн бүтээгдэхүүн баяжмал дахь ашигт бүрдлийн агууламж, зэс авалтын хэмжээгээр үр ашиг нь тодорхойлогддог. Зэс агуулсан флотацийн баяжмал үйлдвэрлэлийн эдийн засгийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх үндсэн нөхцөл нь металл авалтуудыг нэгэн зэрэг нэмэгдүүлэх үед зэс болон молибдены баяжмалын чанарыг аль болох сайжруулах явдал юм.

Зэсийн анхдагч болон хоёрдогч сульфидын эрдсүүдийн янз бүрийн харьцаатай олборлож буй хүдэр дээр боловсруулсан технологийн горимын дагуух лабораторийн олон тооны харьцуулсан туршилтууд нь ойролцоо үр дүнг, зарим тохиолдолд илүү өндөр үр дүнг харуулж байна. Зэсийн үйлдвэрлэлийн техник эдийн засгийн үзүүлэлтийг сайжруулахад зэсийг нь өсгөсөн өндөр агуулгатай зэсийн баяжмалыг боловсруулах нь ихээхэн чухал байр суурийг эзэлж байна. Тооцооллын техник болон хяналтын хэмжих хэрэгслүүдийн хөгжил нь зэс молибдены хүдрийг баяжуулах үеийн үндсэн технологийн процессыг автоматаар тохируулах үр дүнтэй системийг нэвтрүүлэх, байгуулах шинэ боломжуудыг олгож байна[1]. Зэс молибдены хүдэр боловсруулалтын техник эдийн засгийн үзүүлэлтүүд нь хам баяжмалыг салгах аргын үр ашгаар тодорхойлогддог. Зэс молибдены баяжмалыг салгах аргын сонголт нь тэдгээрт агуулагдах эрдсийн бүтэц найрлага, хам баяжмалын урвалжийн горимоос хамаарна[2]. Энэхүү өгүүлэлд Эрдэнэт үйлдвэрийн 2009-2015 оны флотацийн процессын өгөгдлүүд дээр статистик боловсруулалт хийж, хам баяжмал дахь зэсийн агуулга, зэсийн металл авалтыг глобал оптимизацийн аргаар оновчлов. Хамтын флотацийн циклүүдэд санал болгож буй оновчлолын зорилтын тавилт нь дараах хэлбэртэй байна. Удирдлагын зорилт нь зэсийн баяжмалын чанар болон хам баяжмалын үнэт бүрдлүүдийн эцсийн металл авалт (анхдагч хүдрээс хам баяжмал хүртлэх) нь дээд хэмжээндээ байх үеийн урвалж, технологийн хүчин зүйлүүдийн оновчтой хэмжээг тодорхойлох явдал юм. Энэ нь флотацийн процессыг урвалжийн оновчтой горимоор удирдан, чанарын стандартын шаардлага хангасан баяжмал үйлдвэрлэж баяжмал дахь зэс авалтыг нэмэгдүүлэх эдийн засгийн онцгой ач холбогдолтой.

Бодлогын тавил

Зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулга, хам баяжмал дахь зэсийн металл авалтын функцүүдийг 7 хүчин зүйлээс хамааруулж 2-р эрэмбийн загвар буюу квадрат функцүүдийн тусламжтайгаар илэрхийлсэн. Эдгээр функцүүд нь дараах хэлбэртэй.

$$f^1(x) = (A_1x, x) + (b^1, x) + c_1$$

$$f^2(x) = (A_2x, x) + (b^2, x) + c_2$$

үүнд: $(,)$ - 2 векторын скаляр үржвэр;

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7);$$

f^1 – зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулга;

f^2 - хам баяжмал дахь зэсийн металл авалт;

x_1 . Цуглуулагч урвалжийн тун (A)

x_2 . Цуглуулагч урвалжийн (B) тун;

x_3 . Хөөсрүүлэгч урвалжийн тун ;

x_4 . Флотацийн тэжээл дэх нунтаглалтын 0,074мм бүхэллэгийн ангийн гарц ;

x_5 . Хүдэр дэх нийт зэсийн агуулга ;

x_6 . Анхдагч зэсийн хүдрийн агуулга ;

x_7 . Хүдрийн исэлдлийн зэрэг^j

Бид Эрдэнэт үйлдвэрийн доорх хэлбэрийн 5000 өгөгдлийг ашигласан.

x^1	x^2	...	x^n	f^1	f^2	...	f^n
x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	f_{11}	f_{12}	...	f_{1n}
x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	f_{21}	f_{22}	...	f_{2n}
...
x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}	f_{m1}	f_{m2}	...	f_{mi}

Технологийн хүчин зүйлүүдэд тавигдах шаардлагыг бичвэл: $4.90 \leq x_1 \leq 12.0$; $0 \leq x_2 \leq 6.14$; $10.7 \leq x_3 \leq 18.70$; $48.90 \leq x_4 \leq 67.55$; $0.43 \leq x_5 \leq 0.68$; $35.38 \leq x_6 \leq 84.30$; $1.33 \leq x_7 \leq 7.67$

$$A_1 = (a_{ij}^1), A_2 = (a_{ij}^2), i = \overline{1,7}, j = \overline{1,7}; x = (x_1, x_2, \dots, x_7)$$

A_1, A_2 матрицууд болон b^1, b^2 векторууд, c_1, c_2 коэффициентүүдийг хамгийн бага квадратын аргаар гүдгэр програмчлалын бодлого бодож олсон.

$A_1 - \mathbf{H}$ матрицууд нь зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулгад нөлөөлөх хүчин зүйлүүдийн харилцан үйлчлэлийн матриц, $A_2 - \mathbf{H}$ матрицууд нь хам баяжмал дахь зэсийн металл авалтад нөлөөлөх хүчин зүйлүүдийн харилцан үйлчлэлийн матриц, b^1, b^2 нь зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулга, хам баяжмал дахь зэсийн металл авалтад нөлөөлөх хүчин зүйлүүдийн шугаман нөлөөллийн вектор

$$F_l(A, b, c) = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^n b_j x_j + c_l - f_l \right)^2 \rightarrow \min, (1)$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0.129 & 0.046 & -0.081 & -0.061 & 0.109 & 0.893 & 0.128 \\ 0.000 & -0.061 & 0.134 & 0.317 & -0.073 & 0.018 & 0.045 \\ -0.081 & 0.000 & 0.324 & 0.301 & 0.038 & -4.877 & -0.097 \\ 0.622 & 0.317 & -0.739 & -0.569 & 1.148 & 2.851 & 0.085 \\ 0.109 & -0.073 & 0.038 & 0.000 & 0.451 & 0.243 & 0.469 \\ -0.629 & 0.018 & 4.797 & -1.790 & 0.243 & 0.202 & -0.741 \\ 0.128 & 0.045 & -0.097 & 0.085 & 0.000 & 0.815 & 0.036 \end{pmatrix}$$

$$b^1 = (-1.063; -0.654; -0.018; -0.852; -2.305; -1.763; -0.628), c_1 = 3.351$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} -0.033 & 0.002 & 0.054 & -1.901 & -0.189 & -1.012 & 0.020 \\ 0.000 & -0.037 & 0.067 & -0.075 & -0.061 & 0.019 & -0.058 \\ -0.054 & 0.000 & -0.384 & 2.154 & 0.316 & 0.244 & 0.012 \\ 1.270 & -0.075 & -1.700 & -0.134 & -0.196 & 0.084 & 0.067 \\ -0.189 & -0.061 & 0.316 & 0.000 & 0.074 & -0.109 & 0.023 \\ 0.862 & 0.019 & -0.203 & -0.171 & -0.109 & 0.168 & -2.244 \\ 0.020 & -0.058 & 0.012 & 0.067 & 0.000 & 2.081 & 0.024 \end{pmatrix}$$

$$b^2 = (0.917; 0.235; -0.374; 0.617; 0.100; 0.149; -0.118), c_2 = 0.317$$

Баяжмалын агуулга, ээсийн металл авалтын математик загвар

Ээсийн агуулга ба металл авалтын функцүүдийг максимумчлах бодлогыг бичвэл:

$$\begin{aligned} f^1(x) &= \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 a_{ij}^1 x_i x_j + \sum_{i=0}^7 b_i^1 x_i + 3.351 \rightarrow \max, x \in \Pi \\ f^2(x) &= \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 a_{ij}^2 x_i x_j + \sum_{i=1}^7 b_i^2 x_i + 0.317 \rightarrow \max, x \in \Pi \end{aligned} \quad (2)$$

Технологийн хүчин зүйлүүдийн зааглалуудыг кодлон дараах хэлбэрт бичье:

$$\Pi = \left\{ \begin{array}{l} x \in R^7 : 0.41 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq x_2 \leq 1, 0.57 \leq x_3 \leq 1, 0.72 \leq x_4 \leq 1, 0.63 \leq x_5 \leq 1, 0.42 \leq x_6 \leq 1, 0.17 \leq x_7 \leq 1 \end{array} \right\}$$

(2) бодлогын хувьд зорилгын функцүүд нь гүдгэр биш функцүүд тул уг бодлого нь олон экстремальт бодлого юм. Иймд (2) бодлого нь глобал оптимизацийн аргаар бодогдоно. Бодлогын локаль шийдүүдийг градиентийн проекцийн аргаар олсон [7]. Энэ аргын алгоритмыг бичвэл:

Алгоритм 1

Алхам 1. Анхны дөхөлтийн цэг $x^k \in \Pi$ -г сонгоно.

Алхам 2. $x^k(\alpha) = x^k - \alpha f^1(x^k)$, $k=0$, $\alpha > 0$ цацраг байгуулна.

Алхам 3. $P^k(\alpha)$ цэгийг тодорхойлно. $P^k(\alpha) = P_{\Pi}(x^k(\alpha))$, $x > 0$,

Үүнд: P_{Π} нь $x^k(\alpha)$ цэгийн Π муж дээрх проекц.

Алхам 4. α_k алхамыг $f(P^k(\alpha)) < f(x^k)$ нөхцлөөс сонгоно.

Алхам 5. Дараагийн дөхөлтийн цэгийг байгуулна. $x^{k+1} = P^k(\alpha_k)$.

Алхам 6. $x^k = x^{k+1}$ гэж үзээд Алхам 2 руу шилжинэ.

Алгоритм 1-ээр байгуулсан $\{x^k, k = 0, 1, \dots\}$ дараалал нь (1) бодлогын орчны максимум цэг рүү нийлнэ [7]. Өөрөөр хэлбэл,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f^1(x^k) = f^1(\bar{x}), \bar{x} = \arg \max_{x \in \Pi} f^1(x).$$

(1) бодлогынзааглал Π нь

$\Pi = \{x \in R^7 \mid \alpha_i \leq x_i \leq \beta_i, i = \overline{1,7}\}$ хэлбэртэй тэгш өнцөгт муж тул проекцийг хялбархан олж болно. Жишээлбэл,

$$P_i^k(\alpha_k) = \begin{cases} \alpha_i, & \text{хэрэв } x_i^k(\alpha_k) \leq \alpha_i \\ x_i(\alpha_k), & \text{хэрэв } \alpha_i \leq x_i^k(\alpha_k) \leq \beta_i \\ \beta_i, & \text{хэрэв } x_i^k(\alpha_k) \geq \beta_i, \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, 7.$$

Алгоритм 1-ийн кодыг “Матлав” дээр бичиж, (2) бодлогын орчны максимум цэгүүдийг олбол:

Хүснэгт 1. Локаль шийдүүд

#	x^0							$f^1(x^0)f^1(z)$		ρ_L	Time
1	0.408	1.000	0.572	1.000	0.628	1.000	0.167	0.91617	0.93224	6	0.062
2	0.408	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.10581	1.28877	6	0.076
3	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.20652	1.35330	5	0.047
4	0.987	0.920	0.852	0.914	0.893	0.796	0.186	0.87444	1.36455	7	0.015
5	0.658	0.699	0.970	0.783	0.629	0.858	0.847	0.83431	1.36510	10	0.010

Хүснэгт 2. Локаль шийдүүд

#	x^0							$f^2(x^0)$	$f^2(z)$	ρ_L	Time
1	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.87224	1.10128	9	0.090
2	0.408	1.000	0.572	1.000	0.628	1.000	0.167	1.02257	1.04541	5	0.047
3	0.408	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.08494	1.10126	8	0.078
4	0.408	0.000	0.572	0.724	0.628	1.000	0.167	0.93835	1.10021	16	0.031
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.167	0.99559	1.00847	8	0.012

Эндээс глобаль шийд нь:

$$\begin{aligned} \bar{x}_*^1 &= (1.0675893, 0.572193, 1.1, 1.1, 1), & f_1(\bar{x}_*^1) &= 1.365181, \\ \bar{x}_*^2 &= (0.408333, 0.672595, 1.1, 1.1, 1, 0.166876), & f_2(\bar{x}_*^2) &= 1.101275, \\ x_*^1 &= (12.4, 1499864, 10.7, 67.55, 0.68, 84.3, 7.97), & f_1(x_*^1) &= 23.504320, \\ x_*^2 &= (4.9, 4.129735, 18.7, 67.55, 0.68, 84.3, 1.33), & f_2(x_*^2) &= 97.485929. \end{aligned}$$

Тайлбар: Зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулгад нөлөөлөх хүчин зүйлс: цуглуулагч урвалжийн (АероМх) орц нь 12.4 г/т, (ВК901) орц нь 4,1499864

г/т, хөөсрүүлэгч урвалжийн орц 10,7 г/т, флотацийн тэжээл дэх нунтаглалтын 0,074мкм бүхэллэгийн ангийн гарц 67,55%, хүдэр дэх нийт зэсийн агуулга 0,68%, анхдагч зэсийн хүдрийн агуулга 84,3%, хүдрийн исэлдлийн зэрэг 7,97% байхад зэсийн баяжмал дахь зэсийн агуулга нь максимум буюу 23,504320% байна.

Хам баяжмал дахь зэсийн металл авалтад нөлөөлөх хүчин зүйлс: цуглуулагч урвалжийн (АероМх) орц нь 4,9 г/т, (ВК901) орц нь 4,129735 г/т, хөөсрүүлэгч урвалжийн орц 18,7 г/т, флотацийн тэжээл дэх нунтаглалтын 0,074мкм бүхэллэгийн ангийн гарц 67,55%, хүдэр дэх нийт зэсийн агуулга 0,68%, анхдагч зэсийн хүдрийн агуулга 84,3%, хүдрийн исэлдлийн зэрэг 1,33% байхад хам баяжмал дахь зэсийн металл авалт нь максимум буюу 97,485929% байна.

Дүгнэлт

Эрдэнэт үйлдвэрийн баяжмал дахь зэсийн агуулга ба металл авалтын хамаарах хүчин зүйлүүдийг тодорхойлон 2-р эрэмбийн квадрат загварыг байгуулсан. Зэсийн агуулга ба хам баяжмал дахь зэсийн металл авалтыг максимумчлах бодлогыг квадрат програмчлалын бодлого хэлбэрээр томъёолж глобаль шийдийг олох алгоритм дэвшүүлсэн. Энэ нь металл авалтыг үлэмж хэмжээгээр дээшлүүлж, эдийн засгийн өндөр үр ашгийг Эрдэнэт үйлдвэрт олгох боломжтой болсон.

Ашигласан материал

- Л.Дэлгэрбат “Исследование, моделирование и оптимизация процессов измельчения и коллективной флотации медно-молибденовых руд” Московский государственный горный университет. Горный информационно-аналитический бюллетень . 2002г. № 226-230с
- С.Давааням “Разработка энергосберегающей технологии переработки медно молибденовых руд на обогатительной фабрике СП Эрдэнэт с применением селективных собирателей на основе композиции диалкилсульфидов с диалкилдитофосфатами” диссертация кандидата технических наук Москва 2000г.28с
- R.Enkhbat and Ya. Bazarsad, General Quadratic Programming and Its Applications, in Optimization and Optimal Control (eds. A. Chinchuluun, P.M.Pardalos, R.Enkhbat and I.Tsebeendorj), Springer – Verlag New York (2010), 121-139.

- R.EnkhbatandT.Ibaraki, Global Optimization Algorithmsfor General Quadratic Progtamming, Journal of the Mongolian Mathematical Society, 5 (2001), 22-56
- R.N Myers, Response Surface Methodology, Allyn and Bacon, Boston, MA, 1971
- A.S. Strekalovsky and T.V. Yakovleva, On a local and global search involved in nonconvexoptimization problems, Automation and Remote Control, 65 (2004), 375-387
- Bertsekas, D.P., Constrained Optimization and Lagrangean Multiplier Methods, Academic Press, New York, 1982