

Код МРНТИ 52.45.17

T. Kumykova, G. Nurshaiykova, \*A. Akylbaeva, T. Malgazhdarov  
D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

## PRINCIPLES OF QUALITY UNIFORMITY STABILIZATION OF MULTI-GRADE ORES IN THEIR OPEN-PIT MINING

**Abstract.** An analysis of industrial development experience in deposits with complex mineral compositions indicates that improving the efficiency of raw material resource utilization requires the advancement of mining technologies for complex-structure ores. This paper presents the results of experimental research on the quality averaging of ore types and grades during the open-pit mining of complex polymetallic deposits. The authors propose a comprehensive efficiency criterion based on the Hancock and Gaudin-Kelsall approaches, which accounts for the separation process during ore beneficiation. The application of this criterion enables the management of quality homogeneity for multi-grade ores when extracted separately or as a blend. Furthermore, dependencies have been established for metal recovery into concentrates during the flotation of refractory and mixed lead-zinc ore blends.

**Key words:** multi-grade ores, complex-structured polymetallic deposits, controlled selective mining, quality averaging, mixed lead-zinc ores.

### Ашық тәсілмен өндіру кезінде көпсортты кендердің сапалық біртектілігін тұрақтандыру қағидаттары

**Аннотация.** Минералдық құрамы күрделі кен орындарын өнеркәсіптік игеру тәжірибесін талдау шикізат қорларын пайдалану тиімділігін арттыру үшін құрылымы күрделі кендерді өндіру технологиясын жетілдіру қажеттігін көрсетеді. Құрылымы күрделі полиметалл кен орындарын ашық әдіспен игеру кезінде кен түрлері мен сорттарының сапасын орташалаандыру бойынша жүргізілген эксперименттік зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Авторлар кенді байыту кезіндегі бөлу процесін ескеретін, Ханкок пен Годен-Келлсалл тәсілдеріне негізделген кешенді тиімділік критерийін ұсынды. Бұл критерийді пайдалану көп сортты кендерді жекелей немесе араластырып өндіру кезінде олардың сапалық біртектілігін басқаруға мүмкіндік береді. Байытылуы қиын және аралас қорсын-мырыш кендерінің шикізасын флотациялық байыту кезінде металдардың концентраттарға шығу тәуелділіктері анықталды.

**Түйінді сөздер:** көп сұрыпты кендер, күрделі құрылымды полиметалл кен орындары, басқарылатын селективті өндіру, сапаны орташалау, аралас қорға-сын-мырыш кендері.

### Принципы стабилизации качественной однородности многосортных руд при их открытой добыче

**Аннотация.** Анализ опыта промышленного освоения месторождений сложного минерального состава свидетельствует, что для повышения эффективности использования запасов сырья требуется совершенствование технологии разработки сложноструктурных руд. Приведены результаты экспериментальных исследований усреднения качества типов и сортов руд при открытой разработке сложноструктурных полиметаллических месторождений. Авторами предложен комплексный критерий эффективности на базе подходов Ханкока и Годена-Келлсалла, учитывающий разделительный процесс при обогащении руд. Использование данного критерия позволяет управлять качественной однородностью многосортных руд при их добыче раздельно или в смеси. Установлены зависимости извлечения металлов в концентраты при флотационном обогащении шихты труднообогатимых и смешанных свинцово-цинковых руд.

**Ключевые слова:** многосортные руды, сложноструктурные полиметаллические месторождения, управляемая селективная добыча, усреднение качества, смешанные свинцово-цинковые руды.

### Introduction

The primary requirements for the quality of ore feed supplied to beneficiation include uniformity in component content, particle size, moisture, etc., i.e., a set of properties. One of the key tasks of an open-pit mine is to ensure quality formation and parameter stabilization over accounting periods – shifts, days, and weeks. Rapid fluctuations and inconsistencies in quality characteristics hinder adaptation, underscoring the importance of maintaining a stable ore flow quality [1, 2, 3].

Ore quality encompasses a set of natural and technological properties determining enrichability and economic value. Various methodological approaches are applied to stabilize ore mass quality, including [4, 5, 6, 7]:

- *Controlled selective mining through a combination of technical solutions and organizational measures.*
- *Quality averaging of different ore grades through specialized measures ensuring uniform composition based on technologically significant parameters, such as chemical and mineralogical composition, grain size distribution, and the presence of valuable or harmful impurities. To establish an effective averaging scheme, optimal batch ratios in the charge, transport flow optimization, and ore mass stacking sequence must be investigated through experimental studies on intra-grade and inter-grade quality averaging.*

The outlined tasks were addressed using representative technological samples of Zhaim ores, employing methodologies and practical recommendations from experts in the field [8]. The ores, both separately and in mixtures, were enriched using flotation schemes with and without desliming in the flotation laboratory of VNIItsvetmet.

### Materials and methods

Experimental research methods were employed to substantiate the stabilizing quality indicator for ores from complex Atasuy-type polymetallic deposits. The Gaudin-Kelsall ( $\tau_k$ ) criterion is a measure for evaluating quality in separation processes based on the yield of beneficiation products [9]. The Hancock ( $E$ ) criterion allows for a quantitative assessment of ore mass quality based on three parameters simultaneously: the metal content in the feed ore ( $\alpha$ ), the concentrate yield ( $\gamma$ ), and the content of the useful component ( $\beta$ ) [10]. The choice of a comprehensive efficiency criterion – defined as the product of the Hancock index and the Gaudin-Kelsall criterion – is justified by its ability to simultaneously account for both the qualitative recovery of the useful component and the mass yield of the concentrate. This multiplicative approach provides a more rigorous mathematical sensitivity to fluctuations in the slime fraction, which is critical for the complex polymetallic ores of the Zhaim type.

$\gamma/\alpha = \varepsilon$ , metal recovery is considered.

The product of the Hancock and Gaudin-Kelsall criteria:

$$E \cdot \tau_k = \varepsilon \cdot \beta \cdot \frac{(\beta - \alpha)}{(1 - \alpha)} \quad (1)$$

Thus, represents an unambiguous quantitative assessment of the flotation activity of the valuable component.

The symbol  $\xi$  can replace  $E \cdot \tau_k$ , simplifying the notation. This is a quality criterion, which we have named the comprehensive indicator of ore mass beneficiation potential during the extraction of multi-grade ores.

The maximum possible values of the Hancock and Godden-Kelsall criteria are ensured at stoichiometric metal contents in the ore:

$$\begin{aligned} \text{For lead: } E &= 1.55 \cdot \frac{0.866 - \alpha}{1 - \alpha} \\ \tau_k &= 6.463 \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{For zinc: } E &= 1.49 \cdot \frac{0.671 - \alpha}{1 - \alpha} \\ \tau_k &= 2.039 \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

Taking the  $\beta = \text{const}$ , we can find the maximum possible recovery, in this case:

$$\text{For lead: } \xi_{pb} \rightarrow \max \left\{ 7.463 \cdot \frac{0.866 - \alpha \beta}{\alpha_{pb}} \right\}. \quad (4)$$

$$\text{For zinc: } \xi_{zn} \rightarrow \max \left\{ 3.038 \cdot \frac{0.671 - \alpha_{zn}}{\alpha_{zn}} \right\}. \quad (5)$$

The comprehensive quality indicator  $\xi$  enables controlled ore extraction, as it allows for the evaluation of technological parameters of ores with various compositions. According to this criterion, the quality of a technological ore grade is expressed as relative fractions of the maximum possible theoretical values. Calculations are performed for each metal using the formula:

$$E' \cdot \tau_k^1 = E^1 \cdot \frac{\tau_k^1}{E^2} \cdot \tau_k^2, \quad (6)$$

where  $E' \cdot \tau_k^1$  represents the criterion values for the actual metal content in the technological ore grade  $\alpha$ , the expected recovery  $\varepsilon$ , and the concentrate quality  $\beta$ ; moreover,

$$E_1 \cdot \tau_k^1 = \varepsilon \cdot \beta \cdot \frac{\beta - \alpha}{1 - \alpha}, \quad (7)$$

where  $E_2 \cdot \tau_k^2$  is the maximum criterion value, determined from expression (7) at the metal content, assuming 100% recovery and an ideal concentrate quality corresponding to the theoretical metal content in the extracted mineral: for galena  $\alpha_{pb} = 86.6\%$ ; for sphalerite  $\alpha_{zn} = 67.1\%$ .

In practice, for averaging quality based on the mean values calculated by formula (6), the planned (weighted average) value is determined for the entire set of grades involved in the mining and processing process according to the development direction of mining operations. Then, based on the maximum possible values of quality fluctuation within the interval found by the formula:

$$I = \{ + \alpha \cdot \Delta E' \cdot \tau_k'; - \alpha \cdot \Delta E' \cdot \tau_k' \}, \quad (8)$$

the optimal blending ratios of ore grades are calculated. Moreover, the value of the degree of averaging for the concentrate  $\tau_k^3$  in the averaged volume, found by the formula, is determined.

$$\tau_k^3 = \gamma \cdot \beta \cdot \frac{\beta - \alpha}{1 - \alpha}, \quad (9)$$

should be greater than the minimum value of the degree of separation  $\tau_k^{mi}$  calculated at the minimum allowable metal content in the concentrate according to the applicable State Standard standards for concentrates. The analytical expression of this limitation is as follows:

$$\tau_k^3 \geq \tau_k^{min}. \quad (10)$$

When calculating the blending ratios using the variation rang

$$I = \{ + \alpha \cdot \Delta E' \cdot \tau_k'; - \alpha \cdot \Delta E' \cdot \tau_k' \},$$

the maximum possible deviation in the quality of the mixture for one metal is taken into account, since, in general, the averaging indicator values (6) for the extracted metals differ. A simplified method for calculating the blending ratios  $Q_2/Q_1$  of the averaged ore grades is to find the values of the ore grade fractions:

$$Q_2/Q_1 = \frac{\alpha_1(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\alpha^2} \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_2), \quad (11)$$

where  $Q_2/Q_1$  is the fractional ratio of the worst and best quality ore grades to be blended – expressed as a percentage or fraction of a unit, with corresponding metal contents  $\alpha\alpha_1$  and  $\alpha\alpha_2$  and extractions  $\varepsilon\varepsilon_1$  и  $\varepsilon\varepsilon_2$ ;  $\varepsilon\varepsilon_3$  is the planned extraction, expressed as a percentage.

If the ratio of volumes of averaged ore grades in blocks is established, the calculations should be conducted taking into account the reliability of geological reserves  $Q_2 \cdot P(m_x^1)/Q_1 \cdot P(m_x^2)$  in accordance with the detail and stage of the site exploration.

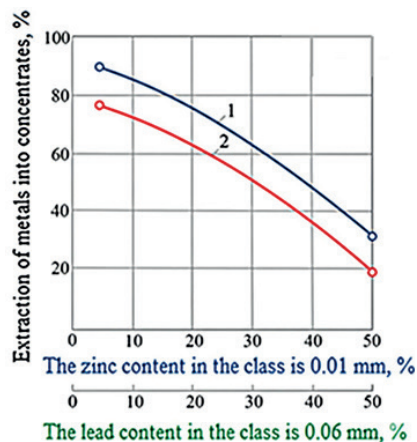
Experimental studies of grade averaging based on calculation formulas (6), (9), and (11) were conducted on small-scale technological samples, represented by rich lead-zinc crystalline-granular ores from quarry No. 2, +297 m level, of the Western Zhayrem deposit, blended with fractions of galena and sphalerite – sample No. 3; difficult-to-beneficiate ores with a lead extraction of 50.9% into the commercial product with a metal content of 13.74% – sample No. 2; and «conditionally balanced» lead-zinc ores with a conditional zinc content below the minimum industrial standard but higher than the cutoff content.

To establish the limits of possible metal extraction reduction during the operational management of mining operations, we investigated the impact of dilution on the quality of lead-zinc ores. The ore was diluted sequentially in steps of 10% from a ratio of ore to waste rock of 9:1 to 1:9.

### Results and discussion

Experimental results demonstrated that all Zhayrem ore grades exhibit fine-grained sulfide dissemination, making beneficiation challenging due to incomplete mineral liberation, even with ultra-fine grinding to 98% passing 74  $\mu\text{m}$ . Additionally, increased slime generation negatively impacted concentrate quality. Different natural ore types exhibit varying beneficiation characteristics. Hydrothermal-sedimentary ores, characterized by unevenly layered textures, abundant globular sulfide formations, and an overall aleuropelitic structure,

contain fine-grained pyrite, galena, and sphalerite, resulting in poor beneficiation performance (Figure 1).



**Figure 1. Dependence of lead and zinc extraction into concentrates on the content of fine-grained sulfide: 1 – extraction of lead,  $n = 96$ ; 2 – extraction of zinc,  $n = 75$ .**  
**Сурет 1. Қорғасын мен мырыштың концентраттарға алынуының жұқа түйіршікті сульфидтердің құрамына тәуелділігі: 1 – қорғасын алу,  $N = 96$ ; 2 – мырыш алу,  $n = 75$ .**

**Рис. 1. Зависимость извлечения свинца и цинка в концентраты от содержания тонкозернистых сульфидов: 1 – извлечение свинца,  $n = 96$ ; 2 – извлечение цинка,  $n = 75$ .**

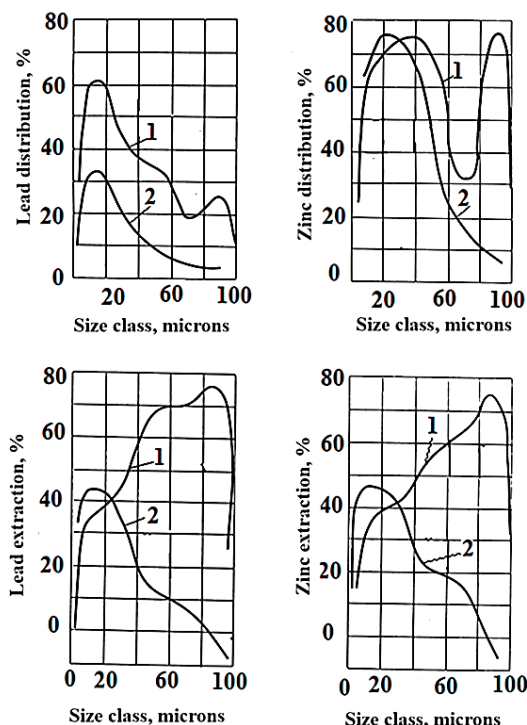
The primary conclusion derived from analyzing the amplitude of quality fluctuations in Zhairam lead-zinc ores and their material composition characteristics is that none of the listed composition parameters can be considered the main criterion for averaging. The combined influence of these parameters necessitates grade-based averaging by mixing higher-quality ores with lower-quality ones.

An analysis of the beneficiation potential based on the dispersion analysis of Zhairam ore beneficiation products has shown that the majority of metal losses occur in the fine-grained fraction ( $-20 \mu\text{m}$ ) (Figure 2).

The distribution curves of lead and zinc in flotation tailings exhibit distinct peaks at the  $-10 \mu\text{m}$  or  $-20 \mu\text{m}$  size fractions, depending on similar peaks in the metal distribution within the flotation feed, except for a peak at the  $+74 \mu\text{m}$  fraction, from which lead and zinc are recovered at approximately 96%.

Diagrams (Figure 3) confirm a significant difference in metal recovery between the «sandy» ( $+20 \mu\text{m}$ ) and slime ( $-20 \mu\text{m}$ ) fractions. This explains the instability of beneficiation performance, decreased selectivity, lower concentrate quality, and increased metal losses in different concentrates as the proportion of metals in the slime fraction increases.

The resulting experimental data (Figure 4) prove the reduction in lead and zinc extraction following a linear law, which allows the following conclusion: when calculating the blending ratios of averaged ore grades, a correction factor for the degree of dilution should be introduced for each separately mined grade to stabilize quality.



**Figure 2. Curves of the dispersed analysis of the products of enrichment of lead-zinc ores: 1 – mixed lead-zinc ores; 2 – tailings.**

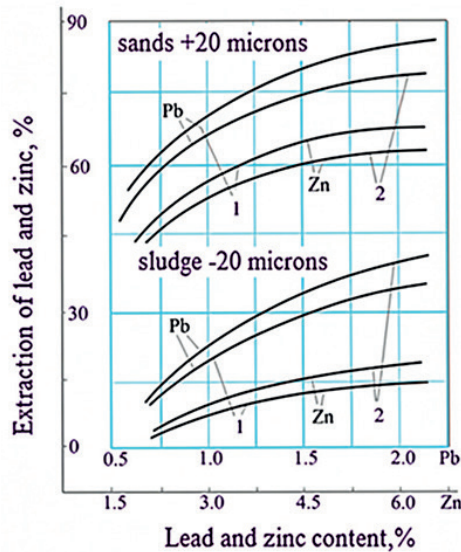
**Сурет 2. Қорғасын-мырыш кендерін байыту өнімдерінің дисперстік талдау қисықтары: 1 – аралас қорғасын-мырыш кендері; 2 – қалдықтар.**

**Рис. 2. Кривые дисперсного анализа продуктов обогащения свинцово-цинковых руд: 1 – смешанные свинцово-цинковые руды; 2 – хвосты.**

Thus, the primary stabilizing indicator of ore quality for stratiform polymetallic deposits of the Zhairam type is the metal content in the slimes fraction, which determines the overall metal recovery. This leads to a crucial conclusion regarding the efficiency of mining complex polymetallic deposits. To ensure the quality homogeneity of the ore flow in terms of metal content when mining multi-grade ores under quality management protocols, it is necessary to standardize the metal content in the slimes fractions of the extracted ore grades. This objective can be achieved through various methods. However, the most effective approach is the proposed method based on a comprehensive beneficiation efficiency criterion. We have designated it as such because this indicator is a product of the Hancock efficiency index, well-known in the theory of separation processes, and the degree of separation by concentrate, also known as the Goden-Kelsall criterion.

The application of the Hancock criterion has provided mathematical confirmation that quantitative separation efficiency is directly dependent on the particle size distribution. High efficiency is achieved in the «sand» fraction ( $+20 \mu\text{m}$ ), whereas the «slime» portion significantly reduces the overall value of the criterion.

It has been experimentally established that a dilution increment of 10% significantly affects selectivity. When the ore-to-waste ratio falls below 7:3, the beneficiation indicators



**Figure 3.** Dependence of the extraction of metals into concentrates on their content in the sand and slurry fractions of ore grinding: 1 – sulfide lead-zinc ores; 2 – mixed lead-zinc ores.

**Сурет 3.** Металдардың концентраттарға шығару дәрежесінің олардың кенді ұнтақтау кезіндегі құмды және шламды фракциялардағы мөлшеріне тәуелділігі: 1 – сульфидті қорғасын-мырыш кендері; 2 – аралас қорғасын-мырыш кендері.

**Рис. 3.** Зависимость извлечения металлов в концентраты от их содержания в песковой и шламовой фракциях помола руды: 1 – сульфидные свинцово-цинковые руды; 2 – смешанные свинцово-цинковые руды.

become unstable. To stabilize concentrate quality, operational management of the blending process (based on formulas 6, 9, and 11) is required to ensure minimum slime formation during the averaging process.

### Conclusions

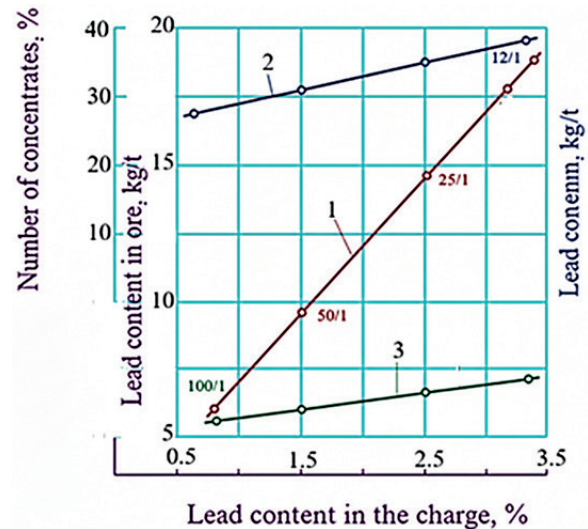
Summarizing the theoretical aspects of the issue and the results of experimental studies conducted on small-scale technological samples of lead-zinc ores from the Zhairam group of polymetallic deposits, the following conclusions can be drawn.

The primary stabilizing indicator of ore quality for Atasu-type stratiform deposits is the metal content in the slime fraction of mineral grains smaller than 20  $\mu\text{m}$ .

The quality of the blend of averaged ore grades directly depends on the quality of the source components and follows a linear relationship. Furthermore, blending low-grade ores with high-grade ones predictably deteriorates the overall technological performance.

### REFERENCES

1. Multi-objective optimization of ore blending in polymetallic open-pit mines based on an improved real-coded element elongation model and NSGA-II / Xiang J. [et al.] // *Mathematics*. 2025. V. 13. No. 11. 1843 p. (in English)
2. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. A variable neighbourhood descent algorithm for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty // *Journal of the Operational Research Society*. 2014. V. 65. 1305–1314 pp. (in English)



**Figure 4.** Dependence of lead extraction into concentrates and the quality of lead concentrates on the charge ratios of hard- and easy-to-enrich grades of lead-zinc ores in the charge: 1 – extraction; 2 – concentrate quality; 3 – losses in the tailings of enrichment (in the numerator the volumes of hard-to-enrich, in the denominator – easily-enriched ores).

**Сурет 4.** Қорғасынның концентраттарға шығарылуы мен қорғасын концентраттарының сапасының шихта құрамындағы байытуға қиын және жеңіл байытылатын қорғасын-мырыш кендерінің үлес қатынасына тәуелділігі: 1 – шығарылу; 2 – концентрат сапасы; 3 – байыту қалдықтарындағы жоғалтулар (алымында – байытуға қиын кендердің көлемі, бөлімінде – жеңіл байытылатын кендердің көлемі).

**Рис. 4.** Зависимость извлечения свинца в концентраты и качества свинцовых концентратов от шихтовочных соотношений трудно- и легкообогащаемых сортов свинцово-цинковых руд в шихте: 1 – извлечение; 2 – качество концентрата; 3 – потери в хвостах обогащения (в числителе объемы труднообогащаемых, в знаменателе – легкообогащаемых руд).

The proposed evaluation method, based on a comprehensive criterion (the product of the Hancock and Gaudin-Kelsall criteria), provides the most accurate prediction of beneficiation efficiency in conditions of complex deposit structures.

### Acknowledgments

The article was carried out within the framework of program-targeted funding (MSHE RK) under the project BR24992854 «Development and implementation of competitive science-based technologies to ensure sustainable development of the mining and metallurgical industry of the East Kazakhstan region».

3. Chen W., Zhang D. Optimization of Ore Blending Strategy for an Open-Pit Mine Using Metaheuristic Algorithms // *Minerals*. 2021. V. 11. No. 9. 945 p. (in English)
4. Kumykov V.Kh., Kumykova T.M. Upravlenie kachestvom pri dobyche mnogosortnykh rud otkryтым способом [Quality management in open-pit mining of multi-grade ores], *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*, 2012. 54–56 pp. (in Russian)
5. Galiev D.A., Farakhov K.A. Provedenie ispytaniy sposoba blochno-orientirovannogo usredneniya v laboratornykh i promyshlennykh usloviyakh [Testing of the block-oriented ore blending method under laboratory and industrial conditions], *Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie gornogo proizvodstva [Scientific and Technical Support of Mining Production]*. 2014. V. 86. 267–271 pp. (in Russian)
6. Li X., Liu Q. Improved Ore Blending Model Considering Metal Grade Uncertainty in Open Pit Mining // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. V. 29. No. 4. 567–576 pp. (in English)
7. Kumykov V.K., Kumykova T.M. Technology of extraction and stockpiling of fire-hazardous ores // *Journal of Mining Science*. 2013. V. 49. No. 4. 99–107 pp. (in English)
8. Kumykov V.Kh., Ipalakov T.T., Kumykova T.M. Printsipy optimizatsii napravleniya razvitiya gornykh работ v kar'ere [Principles of optimization of the direction of mining operations in the open pit]. *Ust-Kamenogorsk: VKGTU*, 2015. 122 p. (in Russian)
9. Abramov A.A. Tekhnologiya obogashcheniya rud tsvetnykh metallov [Technology of Non-Ferrous Metal Ore Beneficiation]. Moscow: Nedra, 1983. 359 p. (in Russian)
10. Michael G. Nelson Hancock's Efficiency: A New Perspective. *Mineral & Metallurgical Processing*. 2004. V. 21. No. 4. 204–208 pp. (in English)

#### ПАЙДАЛАНЫҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Полиметаллды ашық карьерлер үшін көпмақсатты пайдалы қазбаларды араластыруды оңтайландыру / Xiang J. [и др.] // *Mathematics*. 2025. Т. 13. № 11. Б. 1843 (ағылшын тілінде)
2. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. Металл мөлшерінің белгісіздігі жағдайында ашық кен орындарындағы өндіруді жоспарлау есептерін шешуге арналған айнымалы көршілестікке негізделген төмендету алгоритмі // *Journal of the Operational Research Society*. 2014. Т. 65. № 8. Б. 1305–1314 (ағылшын тілінде)
3. Chen W., Zhang D. Метаэвристикалық алгоритмдер негізінде ашық кеніштерде кеннің біркелкі стратегиясын оңтайландыру // *Minerals*. 2021. Т. 11. № 9. Б. 945 (ағылшын тілінде)
4. Кумыков В.Х., Кумыкова Т.М. Ашық тәсілмен көпсортты кен өндіру кезінде сапаны басқару // Перспективалар атты халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары, 2012. Б. 54–56 (орыс тілінде)
5. Галиев Д.А., Фарахов К.А. Блокқа бағытталған орташа алу әдісін зертханалық және өндірістік жағдайда сынау // Тау-кен өндірісін ғылыми-техникалық қамтамасыз ету. 2014. Т. 86. Б. 267–271 (орыс тілінде)
6. Li X., Liu Q. Металл мөлшерінің белгісіздігін ескере отырып, ашық кен жұмыстарында кенді біркелкі жасаудың жетілдірілген моделі // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Т. 29. № 4. Б. 567–576 (ағылшын тілінде)
7. Кумыков В. Х., Кумыкова Т. М. Өрт қауіпті кендерді өндіру және қоймалау технологиясы // *Journal of Mining Science*. 2013. Т. 49. № 4. Б. 99–107 (ағылшын тілінде)
8. Кумыков В.Х., Ипалаков Т.Т., Кумыкова Т.М. Карьердегі тау-кен жұмыстарының даму бағытын оңтайландыру қағидаттары: Өскемен: ШҚМТУ, 2015. 122 б. (орыс тілінде)
9. Абрамов А.А. Түсті металл кендерін байыту технологиясы: М.: Недра, 1983. 359 б. (орыс тілінде)
10. Michael G. Nelson Хэнкок тиімділігі: жаңа көзқарас // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2004. Т. 21. № 4. Б. 204–208 (ағылшын тілінде)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Многокритериальная оптимизация усреднения руд на полиметаллических карьерах на основе усовершенствованной модели удлинения вещественного элемента и НСГА-II / Xiang J. [и др.] // *Mathematics*. 2025. Т. 13. № 11. С. 1843 (на английском языке)
2. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. Алгоритм спуска с переменным окружением для оптимизации производственного планирования на открытых горных работах в условиях неопределенности содержания металла // *Journal of the Operational Research Society*. 2014. Т. 65. С. 1305–1314 (на английском языке)
3. Chen W., Zhang D. Оптимизация стратегии усреднения (смешивания) руды для открытого карьера с использованием метаэвристических алгоритмов // *Minerals*. 2021. Т. 11. № 9. С. 945 (на английском языке)
4. Кумыков В.Х., Кумыкова Т.М. Управление качеством при добыче многосортных руд открытым способом // *Материалы Международной научно-практической конференции*, 2012. С. 54–56 (на русском языке)

5. Галиев Д.А., Фарахов К.А. Проведение испытаний способа блочноориентированного усреднения в лабораторных и промышленных условиях // *Научно-техническое обеспечение горного производства*. 2014. Т. 86. С. 267–271 (на русском языке)
6. Li X., Liu Q. Усовершенствованная модель усреднения руды с учетом неопределенности содержания металла при разработке месторождений открытым способом // *Международный журнал по горным наукам и технологиям*. 2019. Т. 29. № 4. С. 567–576 (на английском языке)
7. Кумыков В. Х., Кумыкова Т. М. Технология добычи и складирования пожароопасных руд // *Journal of Mining Science*. 2013. Т. 49. № 4. С. 627–634 (на английском языке)
8. Кумыков В.Х., Ипалаков Т.Т., Кумыкова Т.М. Принципы оптимизации направления развития горных работ в карьере: Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2015. 122 с. (на русском языке)
9. Абрамов А.А. Технология обогащения руд цветных металлов: М.: Недра, 1983. 359 с. (на русском языке)
10. Michael G. Nelson Эффективность Хэнкока: новый взгляд // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2004. Т. 21. № 4. С. 204–208 (на английском языке)

#### Information about the authors:

**Kumykova T.M.**, candidate of technical sciences, Professor of the School of Earth Sciences, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan), [ktm6010@mail.ru](mailto:ktm6010@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0977-0047>

**Nurshaiykova G.T.**, candidate of technical sciences, Associate Professor at the School Earth Sciences, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan), [GNurshaiykova@edu.ektu.kz](mailto:GNurshaiykova@edu.ektu.kz); <https://orcid.org/0000-0001-9915-8315>

**Akylbaeva A.T.**, Doctor Ph.D, Senior Lecturer at the School of Earth Sciences, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan), [aakylbaeva@edu.ektu.kz](mailto:aakylbaeva@edu.ektu.kz); <https://orcid.org/0000-0002-6093-8530>

**Malgazhdarov T.M.**, Master, Lecturer at the School of Earth Sciences, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan), [tmalgazhdarov@edu.ektu.kz](mailto:tmalgazhdarov@edu.ektu.kz); <https://orcid.org/0009-0008-6601-0478>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Кумыкова Т.М.**, техника ғылымдарының кандидаты, Жер туралы ғылымдар мектебінің профессоры, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан)

**Нуршайыкова Г.Т.**, техника ғылымдарының кандидаты, Жер туралы ғылымдар мектебінің қауымдастырылған профессоры, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан)

**Акылбаева А.Т.**, Ph.D, Жер туралы ғылымдар мектебінің аға оқытушысы, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан)

**Малгаждаров Т.**, магистр, Жер туралы ғылымдар мектебінің оқытушысы «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан)

#### Сведения об авторах:

**Кумыкова Т. М.**, канд. техн. наук, профессор Школы наук о Земле, НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)

**Нуршайыкова Г.Т.**, канд. техн. наук, ассоциированный профессор Школы наук о Земле, НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)

**Акылбаева А.Т.**, доктор Ph.D, ст. преподаватель Школы наук о Земле, НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, (г.Усть-Каменогорск, Казахстан)

**Малгаждаров Т.М.**, магистр, преподаватель Школы наук о Земле, НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)