

УДК 622.72:622.341

Азарян В. А., к.т.н., доц., Жуков С. А., д.т.н., проф. (Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог), **Стриха В. А., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДА ОПРОБОВАНИЯ ЗАБОВ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КАРЬЕРА НА ПРИБЫЛЬ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Определена взаимосвязь между периодом опробования забоев карьера и показателями относительной потери информации о содержании поленого компонента в рудопотоке и прогнозной прибыли ГОКа. Рассмотрена математическая модель процесса опробования забоев карьера при формировании общекарьерного рудопотока. На примере ПАО «Полтавский ГОК» с применением математических методов дана оценка величины возможного снижения прибыли горно-обогатительного комбината вследствие потери информации о содержании полезного компонента как функции от дискретности опробования.

Ключевые слова: рудопоток, опробование, дискретность, содержание полезного компонента, потеря информации, прогнозная прибыль.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Одним из основных условий при формировании рудопотока карьера является стабилизация содержания полезного компонента в заданном диапазоне [1]. Для первоначального формирования рудопотока выполняется расчет объемов руды, добываемых в забоях карьера с различными показателями качества, а для этого необходима достоверная информация о содержании полезного компонента в каждом забое.

Информация о содержании полезного компонента в каждом забое карьера является необходимым условием для формирования рудопотока с заданными качественными характеристиками [2]. При этом от качества рудопотока зависит качество концентрата, который является конечным продуктом ГОКа. От качественных характеристик концентрата зависят основные технико-экономические показатели работы горно-обогатительного комбината [3; 4].

Анализ исследований и публикаций. Периодичность опробования забоев в железорудных карьерах Украины не обоснована и определяется технологическими возможностями служб технического контроля. На рис. 1 показаны фактические значения $Fe_{\text{маг.}}, \%$, ка-

рьера № 3 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с дискретностью 12 часов.

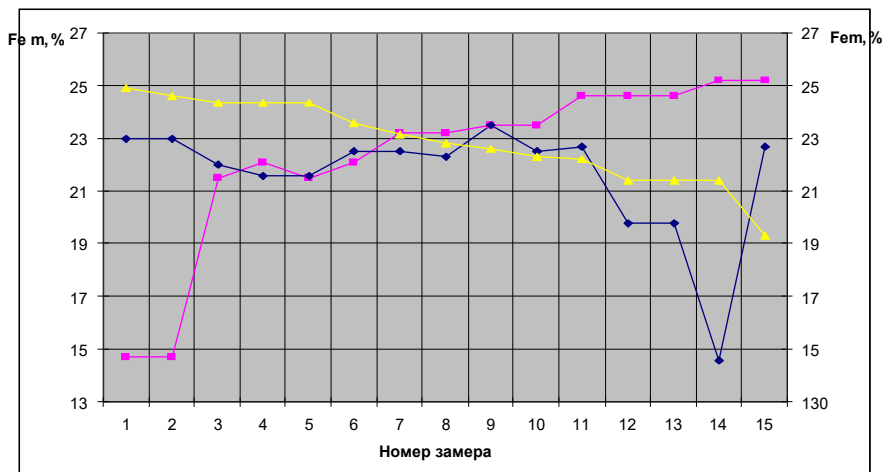


Рис. 1. Фактические значения содержания $Fe_{\text{маг.}}$ % в трех забоях карьера № 3 Горного департамента ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», полученные с дискретностью 12 часов

Значительные колебания качества в забоях железорудных карьеров негативно влияют на возможность формирования рудопотоков с содержаниями полезного компонента в заданных граничных значениях. Обоснования периода опробования позволит получать информацию о содержаниях железа в забоях с периодом, позволяющим свести к минимуму потери информации о качественных параметрах рудной массы. Кроме того, не исследована взаимосвязь между периодом опробования забоев и показателями прибыли горно-обогатительного комбината.

Постановка задачи. Необходимо исследовать и получить зависимость величин потери информации о содержании полезного компонента в формируемом рудопотоке и показателей прибыли ГОКа от периода опробования забоев в карьере.

Изложение материала и результаты. Одним из факторов, влияющих на формирование качества финального рудопотока, является дискретность опробования забоев. Анализ изменения содержания железа в рудном массиве в процессе отработки забоев показывает, что это изменение можно описать стационарным стохастическим процессом с постоянными средним значением и дисперсией.

Пусть $C(t)$ – стационарный стохастический процесс, описывающий содержание железа в забое карьера. В этом случае

автоковариационная функция содержания полезного компонента в руде будет зависеть только от разности моментов времени τ ,

$$R(\tau) = 1/T \int_0^T (c(t) - M[C]) \cdot (c(t + \tau) - M[C]) dt, \quad (1)$$

где $M[C] = 1/T \int_0^T c(t) dt$, $[0, T]$ – рассматриваемый промежуток времени, сек.

При отсутствии запаздывания ($\tau=0$) формула (1) определяет дисперсию содержания полезного компонента в руде

$$R(0) = 1/T \int_0^T (c(t) - M[C])^2 dt = D[C]. \quad (2)$$

Спектральная плотность для рассматриваемого случайного процесса с помощью соотношения Хинчина-Винера [5] запишется в виде

$$S(\omega) = 1/\pi \int_0^\infty R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (3)$$

где ω – круговая частота, 1/сек.

Тогда автоковариационная функция (1) может быть записана в виде

$$R(\tau) = 2 \int_0^\infty S(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega, \quad (4)$$

и дисперсия (2)

$$D[C] = 2 \int_0^\infty S(\omega) d\omega. \quad (5)$$

Если измерение содержания полезного компонента в руде проводится с дискретностью Δ , то максимальная фиксируемая частота при съеме информации равна

$$\omega = 2\pi / \Delta. \quad (6)$$

При этом потеря информации о дисперсии содержания полезного компонента составит величину

$$\delta D[C] = 2 \int_{2\pi/\Delta}^\infty S(\omega) d\omega. \quad (7)$$

И, следовательно, потеря информации, с учетом (7), о среднеквадратическом отклонении содержания полезного компонента

$$\delta\sigma_c = 1/\sigma_c \int_{2\pi/\Delta}^\infty S(\omega) d\omega. \quad (8)$$

В случае, когда руда добывается в n забоях, то в k -ом забое содержание полезного компонента описывается стационарным стохастическим процессом

$$C_k(t), \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

автоковариационная функция, которая имеет вид:

$$R_k(\tau) = 1/T_k \int_0^{T_k} (c_k(t) - M[C_k]) \cdot (c_k(t + \tau) - M[C_k]) dt, \quad (10)$$

где $M[C_k] = 1/T_k \int_0^{T_k} c_k(t) dt$ – математическое ожидание содержания полезного компонента в k -ом забое; $[0, T]$ – промежуток времени измерения содержания в k -ом забое.

В свою очередь, спектральная плотность и дисперсия содержания полезного компонента в k -ом забое, согласно (3) и (5), вычисляются, соответственно, по формулам

$$S_k(\omega) = 1/\pi \int_0^{\infty} R_k(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (11)$$

$$D[C_k] = 2 \int_0^{\infty} S_k(\omega) d\omega. \quad (12)$$

Тогда, согласно (7), потеря информации о дисперсии содержания полезного компонента в руде в k -ом забое, находится по формуле

$$\delta D[C_k] = 2 \int_{2\pi/\Delta_k}^{\infty} S_k(\omega) d\omega, \quad (13)$$

где Δ_k – дискретность измерения содержания в k -ом забое.

В результате шихтовки содержание железа в рудопотоке определяется по формуле

$$C(t) = \sum_{k=1}^n \mu_k \cdot C_k(t), \quad (14)$$

где $C(t)$ – содержание железа в рудопотоке, $\mu_k = V_k / \sum_{k=1}^n V_k$ – объемная доля руды из k -го забоя.

Тогда, согласно (14), потеря информации о дисперсии содержания железа в рудопотоке находится, по формуле

$$\delta D[C] = \sum_{k=1}^n \mu_k^2 \cdot \delta D[C_k]. \quad (15)$$

Подставляя (13) в формулу (15), получаем оценку величины потери информации о дисперсии содержания полезного компонента в рудопотоке вследствие дискретности периода опробования забоев

$$\delta D[C] = 2 \sum_{k=1}^N \mu_k^2 \cdot \int_{2\pi/\Delta_k}^{\infty} S_k(\omega) d\omega. \quad (16)$$

Принимая во внимание (6), (7) и (8), можно записать величину потери информации о среднеквадратическом отклонении содержания полезного компонента в рудопотоке вследствие дискретности опробования забоев,

$$\delta\sigma_c = 1/\sigma_c \sum_{k=1}^n \mu_k^2 \int_{2\pi/\Delta_k}^{\infty} S_k(\omega) d\omega . \quad (17)$$

Руда доставляется из забоев карьера в пункт приемной воронки ЦПТ, где и формируется общекарьерный рудопоток в течение некоторого промежутка времени, поэтому содержание полезного компонента в интегральном потоке может быть найдено по формуле

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{ik} C_{ik} , \quad (18)$$

где $\mu_{ik} = V_{ik} / \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n V_{ik}$, V_{ik} – объем руды, доставляемый в i -й момент времени из k -го забоя; C_{ik} – содержание полезного компонента в руде, доставляемой в i -й момент времени из k -го забоя, N – количество рейсов, доставляющих руду из забоев в течение рассматриваемого промежутка времени.

Тогда потеря информации о среднеквадратическом отклонении содержания полезного компонента в рудопотоке находится по формуле

$$\delta\sigma_c = 1/\sigma_c \sum_{k=1}^n \mu_{\cdot k}^2 \int_{2\pi/\Delta_k}^{\infty} S_k(\omega) d\omega , \quad (19)$$

где $\mu_{\cdot k}^2 = \sum_{i=1}^N \mu_{ik}^2$.

Полученные данные позволяют выявить «скрытую» колеблемость содержания железа в сформированном общекарьерном рудопотоке, вызванную дискретностью опробования забоев.

Рассмотрим математическое моделирование процесса опробования забоев на основе статистических данных о работе экскаваторов № 93 и 56 в карьере ПАО «Полтавский ГОК». На рис. 2 и 3 для забоев, в которых работали эти экскаваторы, представлены значения выборочных автоковариационных функций содержания полезного компонента в руде, рассчитанные по формуле,

$$R_k = 1/N \sum_{i=1}^{N-k} (c_i - \bar{c})(c_{i+k} - \bar{c}) ,$$

где $\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i$, $N = [T/\Delta]$ – число измерений содержания железа, $k = 0, 1, 2, \dots, K$, и аппроксимация этих значений функцией $R(\tau) = D[C] \cdot e^{-\alpha \cdot \tau}$.

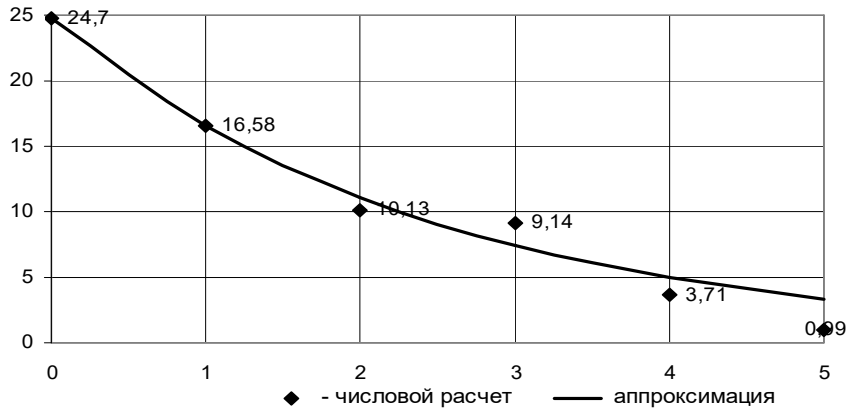


Рис. 2. График автоковариационной функции содержания железа для экскаватора № 93 карьера ПАО «Полтавский ГОК» ($D[C] = 24,7, \alpha = 0,0333$)

Спектральная плотность содержания железа в руде рассчитывается по формуле (3)

$$S(\omega) = \frac{D[C]}{\pi} \frac{\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}.$$

Тогда формула (8) после интегрирования принимает вид

$$\delta\sigma_C = \frac{\sigma_C}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{2\pi}{\alpha \cdot \Delta} \right) \right]. \quad (20)$$

Формула (20) дает возможность оценить потерю информации о величине среднеквадратического отклонения содержания железа в руде в зависимости от дискретности его измерения.

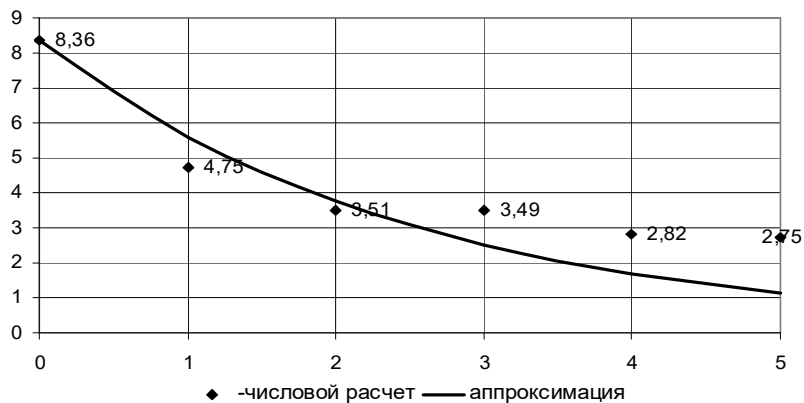


Рис. 3. График автоковариационной функции содержания полезного компонента для экскаватора № 56 карьера ПАО «Полтавский ГОК» ($D[C] = 8,36, \alpha = 0,0333$)

Для рудопотока, сформированного путем смешивания руды из двух рассматриваемых забоев, потеря информации о величине среднеквадратического отклонения содержания железа в руде вычисляется по формуле

$$\delta\sigma_C = \frac{1}{\sigma_C \cdot \pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \mu_k^2 D[C_k] \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{2\pi}{\alpha_k \cdot \Delta_k} \right) \right]. \quad (21)$$

Согласно статистическим данным, с учетом, что $\mu_1 = 0,418$, $\mu_2 = 0,582$ находим

$$D[C] = \sum_{k=1}^2 \mu_k^2 D[C_k] = 0,175 \cdot 24,7 + 0,339 \cdot 8,36 \approx 7,157, \sigma_C \approx 2,68.$$

В результате формула (21) принимает вид

$$\delta\sigma_C = 1,33 - 0,85 \cdot \arctg \left(\frac{188,6}{\Delta} \right). \quad (22)$$

В таблице представлены данные о прогнозной прибыли ПАО «Полтавский ГОК» в зависимости от величины среднеквадратического отклонения содержания железа в рудопотоке при различной крупности измельчения руды.

Таблица

Зависимость прогнозной прибыли ПАО «Полтавский ГОК» от величины среднеквадратического отклонения содержания железа в рудопотоке при различной крупности измельчения руды

d, мкм \ С.К.О	15	30	45	60	75	90
1%	2551	2676	2614	2504	2215	1852
2%	2479	2599	2537	2428	2147	1794
3%	2407	2522	2461	2353	2078	1736
4%	2335	2445	2384	2278	2010	1677
5%	2263	2368	2307	2203	1942	1619

Данные таблицы могут быть аппроксимированы формулой

$$П = 2425 - 71,24 \cdot \sigma_C + 17,4 \cdot d - 0,2535 \cdot d^2, \quad (23)$$

где $П$ – прогнозная прибыль, млн грн; σ_C – С.К.О.%; d – крупность измельчения, мкм.

Следовательно, снижение величины прибыли от потери информации о СКО содержания железа в рудопотоке вследствие дискретности измерения содержания полезного компонента в забоях составит, согласно (23) и с учетом (19),

$$\delta\Pi = \frac{71,24}{\sigma_C} \sum_{k=1}^n \mu_{.k}^2 \int_{2\pi/\Delta_k}^{\infty} S_k(\omega) d\omega. \quad (24)$$

Исходя из формулы (24) и согласно (22), можно получить явную зависимость потери прибыли вследствие дискретности периода измерения содержания полезного компонента в забоях

$$\delta\Pi = 94,75 - 60,55 \cdot \arctg\left(\frac{188,6}{\Delta}\right). \quad (25)$$

На рис. 4 приведен график зависимости относительной потери информации о СКО содержания полезного компонента в рудопотоке от дискретности опробования забоев карьера, а на рис. 5 – график зависимости относительного снижения показателя прогнозной прибыли комбината от дискретности опробования забоев карьера.

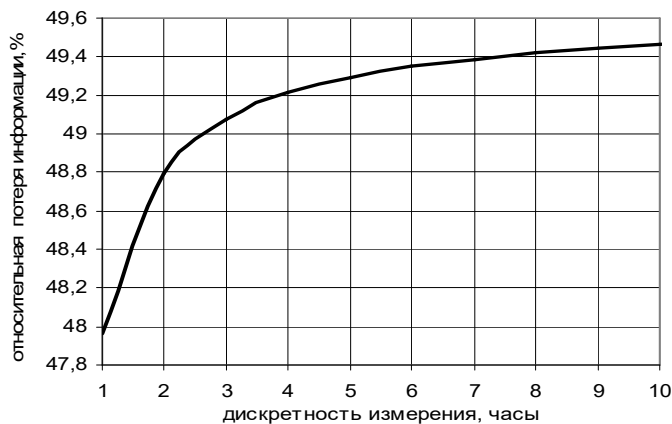


Рис. 4. График зависимости относительной потери информации о величине среднеквадратического отклонения содержания полезного компонента в рудопотоке от дискретности опробования забоев

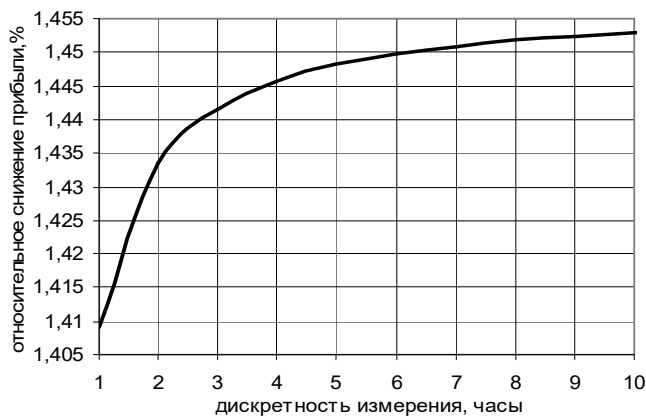


Рис. 5. График зависимости относительного снижения показателя прогнозной прибыли комбината от дискретности измерения содержания железа

Анализ графиков показывает, что с увеличением дискретности измерения содержания железа в забоях увеличивается потеря информации о величине среднеквадратического отклонения содержания полезного компонента рудопотока и снижается показатель прибыли комбината.

Выводы. 1. Получены зависимости относительной потери информации о СКО содержания полезного компонента в рудопотоке от дискретности опробования забоев карьера и относительного снижения показателя прогнозной прибыли комбината от дискретности опробования забоев карьера.

2. Обоснование периода опробования рудных забоев карьера позволит снизить потери информации о содержании полезного компонента, сформировать рудопоток с заданными качественными характеристиками и увеличить показатели прибыли горнообогатительного комбината.

1. Бызов В. Ф. Об усреднении качества руд при объединении грузопотоков / Бызов В. Ф., Вилкул Ю. Г., Максимов И. И. // *Металлургическая и горная промышленность*. – 1982. – № 2. – С. 64–65. 2. Бызов В. Ф. Управление качеством продукции карьеров : учебник для вузов / Бызов В. Ф. – М. : Недра, 1991. – 239 с. 3. Арсеньев С. Я. Внутрикарьерное усреднение железных руд / Арсеньев С. Я., Прудовский А. Д. – М. : Недра, 1980. – 295 с. 4. Бастан П. П., Костина Н. К. Смешивание и сортировка руд / Бастан П. П., Костина Н. К. – М. : Недра, 1990. – 253 с. 5. Кац М. Д. Математические основы теории управления: учебное пособие для практической и самостоятельной работы / М. Д. Кац – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 107 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Перегудов В. В. (Директор ГП «ГПИ «Кривбасспроект»)

Azarian V. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Kryvyi Rih National University), **Zhukov S. A., Doctor of Engineering, Professor** (Kryvyi Rih National University), **Strikha V. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

INVESTIGATION TO HOW THE PERIOD OF MINING FACES TESTING IN THE IRON ORE OPEN PIT AFFECTS THE PROFIT OF THE ORE DRESSING COMBINE

At present, the period of mining faces testing in iron-ore open pit in Ukraine has not been determined. The information on the content of the useful component is removed based on the technical capabilities of the enterprise's special services.

The presence of significant quality fluctuations in the faces adversely affects the possibility of formation of the ore ore flow in a given boundary range. Information on the quality of the ore mass in the faces and the dynamics of its change is the basis for solving the problem of obtaining a common ore flow in the given qualitative characteristics.

As a result of the conducted studies, the relationship between the period of the pit face testing and the relative loss of information on the content of the log component in the formed ore flow and the forecast profit of the GOK was determined. A mathematical model of the process of testing the faces of a quarry during the formation of a common pit ore flow is considered. Based on the example of PJSC Poltava GOK using mathematical methods, the estimate of the possible decrease in the profits of the mining and processing combine is given due to the loss of information on the content of the useful component as a function of the sampling discreteness.

Dependences of the relative loss of information on the RMS of the content of the useful component in the ore flow are obtained from the discreteness of the testing of the pit faces and the relative decrease in the index of the forecast profit of the combine from the discreteness of the testing of the faces of the quarry.

***Keywords:* ore flow, sampling, discreteness, content of useful component, loss of information, forecast profit.**

Азарян В. А., к.т.н., доцент, Жуков С. О., д.т.н., професор
(Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг),

Стріха В. А., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРІОДУ ОПРОБУВАННЯ ЗАБОЇВ
ЗАЛІЗОРУДНОГО КАР'ЄРУ НА ПРИБУТОК
ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ**

Визначено взаємозв'язок між періодом опробування забоїв кар'єра і показниками відносної втрати інформації про вміст корисного компонента в рудопотоці і прогнозного прибутку ГЗК. Розглянуто математичну модель процесу опробування забоїв кар'єра при формуванні загальнокар'єрного рудопотоку. На прикладі ПАТ «Полтавський ГЗК» із застосуванням математичних методів дана оцінка величини можливого зниження прибутку гірничо-збагачувального комбінату внаслідок втрати інформації про вміст корисного компонента як функції від дискретності опробування.

***Ключові слова:* рудопоток, опробування, дискретність, вміст корисного компоненту, втрата інформації, спектральний аналіз, прогнозний прибуток.**
