

УДК 622.72: 622.341

В.А. АЗАРЯН, В.М. СЕРЕБРЕНИКОВ, кандидаты. техн. наук, доц.
Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЕЗНОГО КОМПОНЕНТА НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРИБЫЛИ ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Стабилизация качества в рудопотоках карьеров невозможна без получения достоверной информации о содержании полезного компонента в каждом забое карьера. Качество руды из забоев предопределяет качество рудопотока, который является сырьевой основой для обогатительного производства. От качества рудопотока напрямую зависит качество концентрата, являющегося конечным продуктом ГОКа. Таким образом, существует взаимосвязь между дискретностью опробования забоев карьера, дающим информацию о качестве железорудного сырья и показателями прибыли ГОКа. В статье рассмотрена математическая модель процесса опробования забоев карьера при формировании рудопотока. По данным ПАО «Полтавский ГОК» был рассмотрен пример с применением методов спектрального анализа. В результате была оценена потеря информации о содержании полезного компонента как функция дискретности опробования, что привело к снижению прибыли ГОКа. По итогам исследований были даны рекомендации по выбору оптимальных дискретностей опробования забоев карьера при формировании рудопотока.

Ключевые слова: рудопоток карьера, опробование забоев карьера, дискретность опробования, содержание полезного компонента, потеря информации, спектральный анализ.

Одним из основных условий при формировании рудопотока карьера является стабилизация содержания полезного компонента в заданном диапазоне. 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. [1]

Проблема и ее связь с основными научными и практическими заданиями. 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 показатели прибыли ГОКа.

Анализ исследований и публикаций. В железорудных карьерах Украины производят замеры содержания полезного компонента ежемесячно. Периодичность снятия информации о содержании полезного компонента математически не обоснована, взаимосвязь между периодом опробования и показателями прибыли не исследована. Период опробования забоев карьера определяется технологическими возможностями служб технического контроля.

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

Изложение материала и результаты. Одним из факторов, влияющих на формирование качества 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 железа 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, с.

При отсутствии запаздывания ($\tau=0$) формула (1) определяет дисперсию содержания железа 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 [10] запишется в виде

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

где ω - круговая частота, 1/с.

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 железа 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 железа в руде 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 железа в руде

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

В случае, когда руда добывается в n забоях, то в k -м забое содержание железа в руде описывается стационарным стохастическим процессом

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

автоковариационная функция для которого

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

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

В свою очередь, спектральная плотность и дисперсия содержания железа в k -м 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 железа, добываемом 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 железа в k -м забое.

В результате шихтовки содержание железа в руде определится по формуле

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

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

Тогда, согласно (14), потеря информации о дисперсии содержания железа в руде, 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 железа в рудопотоке вследствие дискретности 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 железа в руде вследствие дискретности измерения содержания железа в руде, добываемой в забоях,

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

Руда доставляется из забоев карьера в пункт приемной воронки ЦПТ в течение некоторого промежутка времени, поэтому содержание железа в шихтованной 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 железа в руде, доставляемой в i -й момент времени из k -го забоя; N - число рейсов, доставляющих руду из забоев, в течение рассматриваемого промежутка времени.

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

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

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

Полученные позволяют выявить “скрытую” колеблемость содержания железа в сформированном рудопотоке, вызванную дискретностью опробования забоев.

Рассмотрим математическое моделирование опробования забоев на основе статистических данных о работе экскаваторов № 93 и 56 в карьере ПАО «Полтавский ГОК». На рис. 1 и 2 для забоев, в которых работали эти экскаваторы, представлены значения выборочных автоковариационных функций содержания железа 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 $R(\tau) = D[C] \cdot e^{-\alpha \cdot \tau}$.

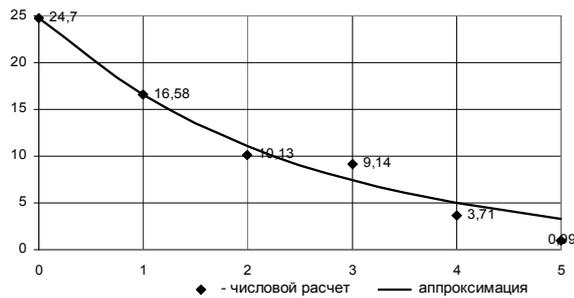


Рис. 1. График автоковариационной функции содержания железа для экскаватора № 93

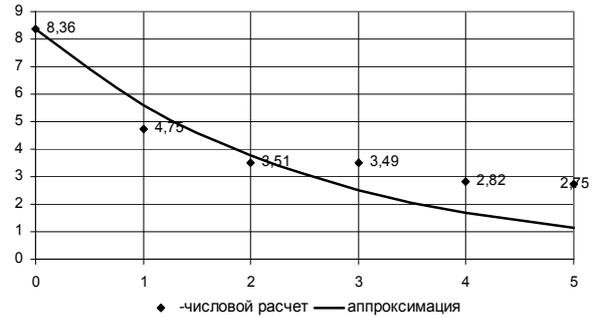


Рис. 2. График автоковариационной функции содержания железа для экскаватора № 56

$$(D[C] = 24,7, \alpha = 0,0333), (D[C] = 8,36, \alpha = 0,0333).$$

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

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

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

Для рудопотока, сформированного путем перемешивания 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 того, $\mu_1=0,418$, $\mu_2=0,582$, находим

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

В результате формула (21) принимает вид

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

В табл. 3 представлены данные о прибыли ОАО «Полтавский ГОК» в зависимости от величины среднеквадратического отклонения содержания железа в рудопотоке и крупности измельчения руды.

Таблица 3

СКО, % \ d, мм	15	30	45	60	75	90
0	2622	2753	2691	2579	2283	1911
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 табл. 3 могут быть аппроксимированы формулой

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

где $П$ - прибыль, млн грн., σ_C - СКО; d - крупность измельчения, мкм.

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

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

Исходя их формулы (24) и согласно (22), можно получить явную зависимость потери прибыли вследствие дискретности периода измерения содержания железа руде в забоях

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

На рис. 3 приведены график зависимости относительной потери информации о СКО содержания железа в рудопотоке от дискретности измерения содержания железа в забое (слева) и график зависимости снижения показателя прибыли комбината от дискретности измерения содержания полезного компонента (справа)

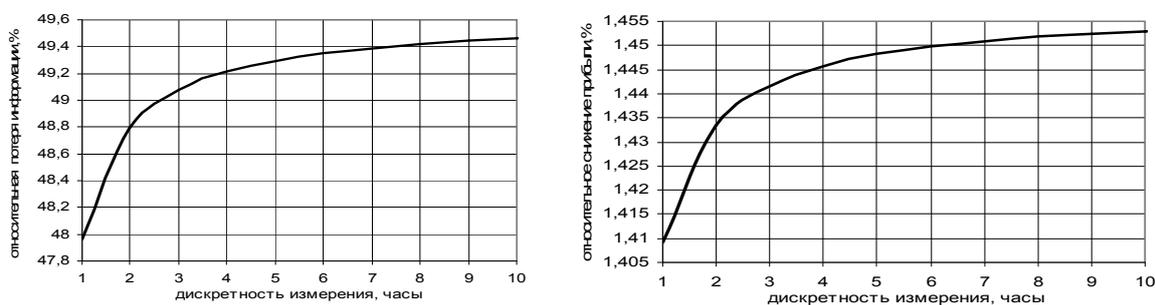


Рис. 3. График зависимости относительной потери информации о величине среднеквадратического отклонения содержания железа в рудопотоке от дискретности измерения содержания железа в забое (слева) и график зависимости относительного снижения показателя прибыли комбината от дискретности измерения содержания железа (справа)

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

Выводы. Получена зависимость снижения величины прибыли от дискретности опробования забоев карьера

Оптимизация цикла опробования рудных забоев карьера позволит снизить потери информации о содержании полезного компонента, сформировать рудопоток с заданными качественными характеристиками и увеличить показатели прибыли горно-обогатительного комбината.

Список литературы

1. Азарян В.А. «Управление качеством в рудопотоках железорудных карьеров Украины» - Материалы 6 международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании», Варна, 4-10 июня 2010 г.
2. Бызов В.Ф., Вилкул Ю.Г., Максимов И.И. Об усреднении качества руд при объединении грузопотоков / В.Ф. Бызов В.Ф., Ю.Г. Вилкул, И.И. Максимов // *Металлургическая и горная промышленность*, 1982. - №2. - С. 64-65.
3. Бызов В.Ф. Управление качеством продукции карьеров: Учебн. для вузов – М.: Недра, 1991. – 239 с.
4. Бабий Е.В., Синенко М.А. «О качестве рудного потока при технологии предобогащения руды в карьере» / Бабий Е.В., Синенко М.А. // *Вісник КТУ: Кривий Ріг*, 2010.
5. Дрига В.В. Исследование и классификация факторов, влияющих на геофизический мониторинг массовой доли магнетита в горной массе / В.В.Дрига // *Вісник Криворізького технічного університету: Кривий Ріг: КНУ*, 2006. – Вип.14. – С.150-153.
6. Азарян А.А., Колосов В.А., Ломовцев Л.А., Учитель А.Д. / *Качество минерального сырья* // А.А. Азарян, В.А.Колосов., Л.А.Ломовцев, А.Д. Учитель. – Кривий Ріг: Минерал, 2001 – 201 с.
7. Жеребцов А.С., Троп А.Е., Зобнин Б.Б. К измерению содержания магнетита в потоке руды. – *Изв. вузов. Горный журнал*, 1974. – №7.
8. Арсеньев С.Я., Прудовский А.Д. Внутрикьерное усреднение железных руд. – М.: Недра, 1980.
9. Бастан П.П., Костина Н.К. Смешивание и сортировка руд. – М.: Недра, 1990.
10. 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.

Рукопис подано до редакції 26.03.15