

Усунути вказані недоліки можливо за допомогою заміни системи «амплістат» на оптимальну автоматизовану систему керування збудженням тягового генератора, що дозволить значно підвищити ефективність роботи об'єкта залізничного транспорту, вивільнити робочий час ремонтних бригад, зменшивши цим самим фінансові затрати.

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** Отже, на основі проведеного аналізу спеціальних джерел інформації, можна зробити висновок, що використання удосконаленої системи автоматичного керування тяговим генератором є актуальною задачею. Вже зараз можна оцінити економічний ефект за такими критеріями, як зниження витрат палива, зменшення затрат на ремонт тепловоза, підвищення продуктивності тепловоза[2]. Завдяки запланованій гнучкості програмного забезпечення САК та можливості її подальшого вдосконалення і введення в дію, можлива окупність даної системи за рахунок покращення ергономічних, екологічних та техніко-економічних показників об'єкта залізничного транспорту.

#### *Список літератури*

1. Вилькевич Б.И. Электрические схемы тепловозов типов ТЭ10М и ТЭ10У. – М.: Транспорт, 1993. – 144 с.
2. Котов О. Автоматизированная многофункциональная система управления локомотивом // Журнал «СТА». – М.: Недра, 1998. - №4. – с.34 – 40.
3. Сильнищев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. Системах» - М.: Высш. шк., 1991. – 335 с.
4. Сорин Л.Н. Автоматизированные системы управления для железнодорожного транспорта / Сорин Л.Н. // Вісник СНУ ім.Далія, 2011. - №4(158) ч.1. – с. 205 – 207.

Рукопис подано до редакції 05.04.12

УДК 622.34:658.562

М.В. ШОЛОХ, канд. техн. наук, доц., О.Л. ТОПЧІЙ  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОРИСНОЇ КОПАЛИНИ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ОСВОЄННІ РОДОВИЩА**

Розглянуто методи прогнозування якісних показників корисної копалини при комплексному освоєнні родовищ. Виконано детальний аналіз мінливості показників в конкретних умовах оцінювання об'єму і формування якості рудної сировини гірничо-видобувних підприємств.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Прогнозна оцінка середніх значень геологічних показників у надрах - одна з найважливіших при реалізації функцій маркшейдерсько-геологічного управління об'ємом і якістю рудної сировини при комплексному освоєнні родовища. Застосування методів, що засновані на теорії випадкових функцій, дає задовільні результати для блоків малого розміру, мало вивченими за результатами розвідувальних даних[1-3].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідження з перерахованих питань для окремих видів корисних копалин, стадій освоєння родовищ, рівнів і періодів управління розглянуті в роботах В. О. Букринського, В. М. Гудкова, А. Б. Каждана, П. О. Риждова, І. Н. Ушакова, І. І. Фінаревського, У. Крамбейна, Ж. Матерона, Ж.-М. Ренду та ін. При наявності ефективних розробок окремих питань дотепер, однак, відсутні комплексні дослідження, що спрямовані на створення теорії, методів і технологій прогнозування якісних показників корисної копалини при комплексному освоєнні надр.

**Постановка завдання.** Проблема оцінки якісних показників корисної копалини у надрах є досить актуальною для гірничо-видобувної промисловості. Її успішне вирішення можливо тільки на основі глибокого вивчення і обґрунтування функцій і об'єктів маркшейдерсько-геологічного забезпечення, аналізу факторів, що впливають на результати прогнозування, вибору раціонального комплексу математичних методів вирішення завдань і побудови ефективної системи обробки масивів інформації з використанням комп'ютерних технологій.

**Викладення матеріалу та результати.** Руди балансових запасів корисних копалин представляють собою складні мінеральні агрегати, які складаються з суміші рудних і нерудних мінералів - кремнезему, глинозему, вапна, магnezії та ін. Крім того, руди містять у різних кількостях як корисні (залізо, марганець, нікель, ванадій, мідь, титан та ін.), так і шкідливі (сірка, фосфор, цинк, свинець та ін.) домішки. Корисні домішки впливають на якість металу, що виплавляється. Вони можуть мати цінність для самостійного використання. Характер дії шкідливих домішок діаметрально протилежний дії корисних, тому вони повинні бути вилучені повністю або їхній вміст повинен бути доведений до припустимих меж.

Характерною рисою гірничорудної промисловості є те, що рудна сировина, видобута навіть із одного блоку, характеризується мінливістю фізико-хімічних властивостей, які підсилюються тим, що рудна сировина на перероблення, зокрема на збагачувальну фабрику, надходять з декількох блоків, горизонтів, шахт, кар'єрів і має різне збагачування. Коливання фізико-хімічних властивостей рудної сировини, вимагає оперативної мінливості або перебудови технологічного процесу виробництва, в протилежному випадку це пов'язано з додатковими втратами рудної сировини, збільшенням виходу готової продукції (концентрат, агломерат, окатиші) більш низької якості.

Отже, на процес формування якості кінцевої продукції гірничовидобувного підприємства при комплексному освоєнні, поряд з природною якістю руд, умовами їхнього залягання, фізико-механічними властивостями і мінералогічними складовими, суттєвий вплив надає кількісне співвідношення різновидів руд, які надходять на перероблення, і стабільність їхніх фізико-хімічних властивостей. Природна якість рудної сировини в процесі видобування набуває мінливості залежно від призначення, комплексу властивостей і вимог, які висуваються споживачем.

Система управління якістю, як і будь-яка система управління повинна містити вхід і вихід, які пов'язані між собою прямими і зворотними зв'язками. Механізм дії системи управління якістю повинен бути подібний до механізму дії кібернетичної системи. Виникаючі в системі протиріччя через зворотні зв'язки, впливаючи на вхід системи, відновлюють її порушену рівновагу. Так, при зміні вимог споживача до якості рудної сировини необхідна мінливість її якості при видобуванні, яка у свою чергу викликає необхідність впливу на фактори, що визначають її рівень, у результаті чого, виготовляється продукція нової якості. На основі інформації про результати споживання даної рудної сировини знову виконується технологічне регулювання якості готової продукції, яка виготовляється. Даний процес повторюється доти, поки не буде досягнуто необхідний споживачеві рівень якості рудної сировини.

Необхідною умовою нормального функціонування системи управління якістю при комплексному освоєнні родовища є наявність своєчасної і достовірної інформації про якість рудної сировини, яка видобувається і споживається, тому що між інформацією і управлінням якістю рудної сировини існує взаємообумовлений зв'язок - при відсутності достатньої інформації неможливе ефективне здійснення процесу управління, а при відсутності управління втрачає сенс і інформація. Представляється доцільним вести роботи з управління якістю, які спрямовані на безпосереднє забезпечення високої якості рудної сировини, і роботи, що спрямовані на вдосконалювання структури управління підприємством і приведення її у відповідність із системою управління якістю рудної сировини.

Існує два варіанти реалізації методу прогнозування якісних показників корисної копалини при комплексному освоєнні родовища. Перший варіант пов'язаний з точним вирішенням системи рівнянь крайгінга (дискретний крайгінг), другий - з можливими спрощеннями, виходячи з фізичного смислу рівнянь (випадковий крайгінг).

Спрощення рівнянь можливо, зокрема, при таких ситуаціях, коли результат оцінювання очевидний до проведення розрахунків. Якщо лінійні розміри блоку, що оцінюється мають той же порядок, що і середня відстань між точками опробування, тоді в оцінку блоку істотний внесок внесуть лише ті проби, які ближче всього розташовані до центра оцінюваного блоку, тобто вагові коефіцієнти проб, що вилученні від блоку, будуть дорівнювати нулю. Такий висновок підтверджується точним вирішенням системи рівнянь крайгінга, що враховують всі вихідні дані. Другий варіант пов'язаний з оцінкою порівняно більших блоків. У цьому випадку варто очікувати, що всі проби, які перебувають у межах блоку, що оцінюється, будуть мати приблизно однакові ваги. Проби на периферії блоку також увійдуть в оцінку з однаковими вагами, відмінними від ваг для проб в середині блоку.

Таким чином, висновок про можливість спрощення рівнянь крайгінга, а отже, і оцінки середнього значення показника повинен базуватися як на дослідженні мінливості показників, так і на аналізі геометричних характеристик блоків, що оцінюються, параметрів розвідувальних мереж. Як показують розрахунки, для малих блоків досить залучити для оцінки три - шість найближчих проб. У цьому випадку для регулярних мереж опробування розрахунки коефіцієнтів можуть бути проведені заздалегідь для найбільш типових конфігурацій взаємного розташування блоку і проб, що беруть участь в оцінці.

Подібні розрахунки для моделей мінливості, описаних схемами де Вейса і сферичною, наведені в [4]. Аналогічні приклади для експонентної схеми розглянуті в роботі [1]. При використанні комп'ютерних технологій для знаходження оцінок середніх значень якісних показників у таких бло-

ках у випадках відхилення від стандартних умов алгоритмічно зручніше вирішувати задаючи число проб, що беруть участь в оцінці, або межі ореола, у межах якого проби залучаються до оцінки. І в тому, і в іншому випадку порядок системи рівнянь крайгінга не перевищує шести. Якщо лінійні розміри блоків перевершують середню відстань між пробами в декілька разів, а об'єми блоків набагато менші об'єму рудного тіла, у якому вони перебувають, то оцінка може бути спрощена.

Якщо число проб, що попадають в оцінюваний блок об'єму  $v$ , дорівнює  $n$ , а число всіх проб у межах поля  $V$  дорівнює  $N$ . Тоді в якості оцінки інтеграла використовуємо вираз

$$\tilde{C} = \lambda C_n + (1 - \lambda) \bar{C}_N, \quad (1)$$

де  $\bar{C}_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C_k$  - середня арифметична оцінка показника по пробах у середині блоку  $v$ ;

$\bar{C}_N = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N C_m$  - середня арифметична оцінка показника по пробах всього поля  $V$ .

Якщо припустити, що проби в межах блоку  $v$  розташовані випадково і сам блок розташований випадково в полі  $V$  (гіпотеза випадкового крайгінга), то вираз для  $\lambda$  і дисперсії будуть мати зручний для розрахунків вид

$$\lambda = \frac{\sigma_v^2}{\sigma_n^2 + \frac{n}{N-n} \sigma_v^2}; \quad \sigma_k^2 = (\sigma_n^2 - \sigma_v^2) \left[ 1 - \frac{\sigma_n^2 - \sigma_v^2}{\frac{N}{N-n} \left( \sigma_n^2 + \frac{n}{N-n} \sigma_v^2 \right)} \right], \quad (2)$$

де  $\sigma_n^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n K(|\bar{r}_k - \bar{r}_m|)$ ,

Якщо число проб  $N$  по всьому полю  $V$  значно перевершує число проб  $n$  в середині блоку  $v$ , що оцінюється, то можна одержати наближені формули

$$\lambda \approx \sigma_v^2 / \sigma_n^2; \quad \sigma_k^2 = (1 - \sigma_v^2 / \sigma_n^2) \sigma_v^2. \quad (3)$$

Параметри оцінки і дисперсії крайгінга блоку  $v$  залежать від числа проб, а також від характеристик автокореляційної  $K(r)$  або структурного  $S(r)$  функцій. Отже, при оцінці великих і малих блоків громіздкі рівняння крайгінга значно спрощуються. Розрахунки можуть бути проведені досить швидко при відсутності закономірної складової в розміщенні ознаки  $C(x, y, z)$ .

При наявності тренда, всі розглянуті наближення стають неправомочними. У цьому випадку необхідно виділити тренд, використовуючи метод найменших квадратів. Коефіцієнти рівняння тренда, обумовлені по цьому методі не зміщені, однак вони не мінімізують дисперсію, якщо відхилення значень ознаки від тренда автокорельовані. При визначенні тренда можна досліджувати відхилення на автокореляцію. При її наявності оцінки коефіцієнтів автокореляції, що обчислюються по різницях, будуть зміщеними.

Геостатистичні розрахунки для відхилення від тренда, що обумовлений методом найменших квадратів, можуть виявитися неефективними, необхідно також враховувати автокореляції відхилення при підборі рівнянь тренда. У такому обліку немає необхідності, якщо число точок опробування більше 100. У протилежному випадку варто видозмінити підхід до проблеми оцінки, що приводить до рівнянь крайгінга.

Методика універсального крайгінга, що дозволяє зменшити зсув оцінок, базується на слідуючому: значення показника в надрах можна представити у вигляді

$$C(r) = m(r) + R(r), \quad (4)$$

де  $m(r)$  - закономірна складова (тренд);  $R(r)$  - відхилення, що представляють значення реалізації стаціонарної випадкової функції з нульовим математичним очікуванням, тобто

$$M[C(r)] = m(r) \quad \text{і} \quad M[R(r)] = 0.$$

Рівняння тренда представимо у вигляді лінійної комбінації відомих функцій  $\varphi_k(x)$

$$m(r) = b_1 \varphi_1(r) + b_2 \varphi_2(r) + \dots + b_q \varphi_q(r). \quad (5)$$

Оптимальний вибір коефіцієнтів  $b_q$  і становить сутність універсального крайгінга. Якщо відоме значення показника  $C$  у точках  $r_i$ , тобто  $C_i = C(r_i)$ , причому число проб  $N$  перевершує число коефіцієнтів у рівнянні тренда  $q(N > q)$ . Тоді

$$C_i = m(r_i) + R(r_i); \quad (6)$$

$$m(r_i) = b_1 \varphi_1(r_i) + b_2 \varphi_2(r_i) + \dots + b_q \varphi_q(r_i), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Оцінку компонента  $m(r)$  у точці  $r_0$  знайдемо у вигляді лінійної комбінації

$$\tilde{m}(r_o) = \sum_{i=1}^N p_i C_i \quad (8)$$

Умова незміщення такої оцінки

$$M[\tilde{m}(r_o) - m(r_o)] = 0 \quad (9)$$

Підставивши (6) і (8) в (9), отримаємо

$$\sum_{i=1}^N p_i \varphi_k(r_i) = \varphi_k(r_o), \quad k = 1, 2, \dots, q \quad (10)$$

Додатковою умовою є вимога мінімуму дисперсії оцінки  $\tilde{m}$

$$M[\tilde{m}(r_o) - m(r_o)]^2 = \min \quad (11)$$

Мінімізація дисперсії методом множників Лагранжа приводить до системи рівнянь універсального крайгінга

$$\sum_{j=1}^q Q_{ij} b_j = P_j, \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (12)$$

де  $Q_{ij}$  - елементи матриці  $Q$  з  $q$  рядками і  $N$  стовпцями, причому

$$Q = \Phi^T S^{-1} \Phi,$$

де  $\Phi = \|\varphi_{ij}(x_i)\|$ ;  $\Phi^T$  - матриця, транспортована стосовно матриці  $\Phi$ ;  $S^{-1}$  - матриця, зворотня матриці коваріаційних відхилень у точках опробування  $S$ , елементи якої визначаються як

$$S_{ij} = M[R(r_i)R(r_j)], \quad i, j = 1, 2, \dots, N.$$

У свою чергу,  $P_j$  представляє собою елементи вектора-стовпця  $P$

$$P = \Phi^T S^{-1} F,$$

де  $F$  - вектор-стовпець, елементи якого суть значення показника  $C_i$  у точках опробування  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Оцінку тренда в довільній точці  $r_o$  знаходимо з виразу

$$\tilde{m}(r_o) = \sum_{k=1}^q \tilde{b}_k \varphi_k(r_o) \quad (13)$$

Для знаходження оцінки показника в точці  $r_o$  необхідно оцінити також компоненту  $R(r_o)$ . Проводячи відповідність крайгінгу до загальної теорії і враховуючи, що  $M[R(r)] = 0$ , одержимо вираз оцінки

$$\tilde{R}(r_o) = S_o S^{-1} \tilde{R} \quad (14)$$

де  $S_o = (S_{o1}, S_{o2}, \dots, S_{oN})$  - вектор-рядок, елементи якого  $S_{oi} = M[R(r_i)R(r_o)]$ ;  $R$  - вектор-стовпець із елементами  $f_i - \tilde{m}(r_i)$ .

Розглянуті вище геостатистичні методи оцінки якісних показників (дискретний, випадковий і універсальний крайгінг) найбільш ефективні (по точності) в умовах геологічної і статистичної однорідності блоків, що оцінюються. Однак на більшості родовищ ці умови рідко виконуються, що приводить до необхідності поділу блоків на однорідні об'єми. Враховуючи це запропонована модифікація крайгінга - індикаторний крайгінг, що дозволяє одержати ефективну геостатистичну оцінку якості в блоках, що складенні різнотипними рудами. Суть методу полягає в наступному.

Поряд зі звичайними варіограмами вмістів для кожного типу руди будують індикаторні варіограми. Для цього вводять індикаторні мінливості

$$I(x) \begin{cases} \dots 1, & \text{якщо проба в точці } x \text{ віднесена для руди даного типу} \\ \dots 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Отже для  $n$  типів руд вводяться  $n$  індикаторних мінливих  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )... Потім будують варіограми для індикаторних мінливих. Після побудови моделі мінливості проводять звичайний крайгінг індикаторних мінливих у заданому блоці. Отримані оцінки  $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$  представляють собою відносні частки руд кожного типу в блоці.

Після оцінювання результати мінімізують

$$\sum_{i=1}^n \omega_i [I_i - I_i^*] = \min$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + \dots + I_n = 1; \\ I_1 \geq 0; I_2 \geq 0; \dots; I_n \geq 0, \end{cases}$$

де  $\omega_i$  - вагові коефіцієнти, які задані заздалегідь, у найпростішому випадку  $\omega_i=1/n$ ,

Остаточні оцінки  $I_i$  знаходять методом квадратичного програмування. Якщо відомі варіограми для вмістів  $Z_i$  по кожному типу руд, то середній вміст в блоці знаходять таким же способом. Тобто спочатку визначають оцінки за допомогою крайгінга мінливості  $Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_n^*$ , потім методом квадратичного програмування знаходять остаточні оцінки  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ , виходячи з виразу

$$\sum_{i=1}^n \omega_i (Z_i - Z_i^*)^2 = \min$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^n I_i Z_i = Z; Z_i \geq 0.$$

де  $Z$  - оцінка крайгінга в блоці по усередненій варіограмі по всіх типах руд.

Питання про ефективність застосування різних математичних методів прогнозування показників у надрах досліджувалось в [2,3]. До теперішнього часу отримані дані не дозволяють віддати перевагу традиційним або геостатистичним методам, що пов'язано з недостатньо глибоким аналізом конкретних гірничо-геологічних умов їхнього використання.

Для обґрунтування доцільності включення в систему маркшейдерсько-геологічного управління якістю руд і рудної сировини найбільш ефективних (за точності) математичних методів прогнозування якості на великому фактичному матеріалі по експлуатованих рудних родовищах було проведено порівняння розглянутих модифікацій крайгінга із трьома найбільш часто застосовуваними на практиці традиційними методами: середньозваженого арифметичного; зі зва-

У результаті порівняння встановлена залежність точності оцінок, що отриманні різними методами від виду моделі мінливості кількості інформації, розмірів і просторового співвідношення блоків, що оцінюються і розвідувальної мережі. Розглянуто оцінку блоків малого і великого розмірів з різним числом розвідувальних даних у блоках і за їхніми межами. Ефективність методів визначалася по величині відносної похибки оцінок у порівнянні їх з фактично вимірюваними значеннями на відпрацьованих ділянках родовищ.

З наведених даних слідує, що універсальний крайгінг, що враховує автокореляції відхилень при підборі рівнянь тренда, дає помітно кращі результати для блоків малого розміру. При відсутності тренда методи оптимального статистичного оцінювання характеризуються меншою похибкою, величина якого залежить від відносного внеску  $C_k$  у загальну мінливість. Дискретний крайгінг дає тим меншу похибку порівняно з іншими методами, чим більше корелюєма випадкова складова. Результати, які отриманні всіма методами, по точності рівні, якщо випадкова складова  $C_c$  превалює. При оцінці якісних показників великих блоків випадковий крайгінг у порівнянні із середньозваженою арифметичною оцінкою дає кращі результати при наявності кореляційної складової  $C_k$  і за умови, що величина інтервалу кореляції порівнянна з лінійними розмірами блоку. При випадковому розміщенні ознаки обидва методи по точності оцінок дають фактично однакові результати.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Вирішення більшості з перерахованих задач можливо тільки з застосуванням комп'ютерних технологій, що дозволяє вирішувати як організаційні задачі, так і завдання прогнозування якісних показників родовищ в умовах комплексного їх освоєння. Інакше кажучи, впровадження на гірничих підприємствах комп'ютерних автоматизованих систем управління є, наряду з удосконаленням техніки і технології на шахтах, кар'єрах і збагачувальних фабриках, основою забезпечення високої якості рудної сировини і ефективності виробництва.

#### Список літератури

1. Аврамов В. Е., Азбель Е. И., Ефремова Н. И. Планирование эксперимента и прогнозирование качества сырья на горных предприятиях. Новосибирск, Наука, 1979.
2. Ершов В. В. Прогнозирование показателей при геолого-маркшейдерском управлении качеством руд.- В кн.: Применение ЭВМ и математических методов в горном деле, т. 2. М, Недра, 1982, с. 95-'100.
3. Марголин А. М. Оценка запасов минерального сырья. Математические методы. М., Недра, 1974.
4. Ржевский В. В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М, Недра, 1980.

Рукопис подано до редакції 05.04.12