

9. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.

10. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.

11. **Синчук О.Н.** Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.

12. **Бирзниец Л.В.** Импульсные преобразователи постоянного тока. - М.: Энергия, 1974. - 256 с.

13. **Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.** Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.

Рукопис подано до редакції 03.04.2019

УДК 622.03-047.58:622.22

М. В. ШОЛОХ, канд. техн. наук, доц., М. П. СЕРГЕСЬВА, ст. викладач,  
Криворізький національний університет

## **АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНО-ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ МІНЛИВОСТІ ВМІСТУ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОРИСНИХ КОПАЛИН У МАСИВІ І ЗАЛІЗОРУДНІЙ МАСІ ШАХТ І КАР'ЄРІВ**

**Мета.** Метою даної роботи є аналіз методів моделювання відособлених і взаємозалежних динамічних рядів природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин. Побудова моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів і використання базується на методах аналізу тимчасових рядів вмісту якісних показників корисних копалин.

**Методи дослідження.** Моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин пов'язане з узагальненням методу для ізольованих рядів. Розглянуто підходи для моделювання взаємозалежних динамічних рядів природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин. Побудовано адаптивну і дискретну лінійну модель прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин множинної регресії та алгебраїчного критерію стійкості. Для моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів вмісту якісних показників використано алгоритм Марквардта, а для нелінійного методу – метод найменших квадратів.

**Наукова новизна.** Для ілюстрації методики послідовних операцій ідентифікації моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин відособлених рядів вмісту якісних показників залізорудної маси для дільниць рудного тіла і покладів родовищ Кривбасу розглянуто приклади визначення центрованої постійної моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак і розрахунок прогнозних оцінок вмісту якісних показників корисних копалин у масиві і залізорудній масі. Запроектовано рекомендації технології прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин окремих рівнів залізорудної маси з невеликими інтервалами дискретності.

**Практична значимість.** Рекомендована методика моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин і побудова моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин динамічних рядів, обмежується двома взаємозалежними динамічними рядами вмісту якісних показників корисних копалин.

**Результати.** Розглянуті моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак мають високоадаптивні властивості, високу точність прогнозування і можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. За рахунок ефективного статистичного аналізу інформації прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак окремих рівнів потоків залізорудної маси, які пов'язанні технологічними процесами досягнуто узагальнення методів прогнозування ізольованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин на взаємозалежні.

**Ключові слова:** моделювання, динамічні ряди, родовище, залізисті кварцити, об'ємно-якісні показники.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-92-99

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Побудова моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі, динамічних рядів вмісту якісних показників і використання для прогнозування базується на методах аналізу тимчасових рядів вмісту якісних показників корисних копалин [1]. Було встановлено, що найбільш завершений і досконалий – метод Бокса-Дженкінса [2]. Основними перевагами моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показ-

ників корисних копалин є адаптивні властивості, точність прогнозування і можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Досягається це за рахунок ефективного статистичного аналізу інформації характеристик об'ємно-якісних ознак окремих рівнів залізородних потоків, які пов'язанні технологічними процесами з узагальненням методів прогнозування ізольованих рядів природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників використання корисного компоненту, пов'язаного з магнетитом, на взаємозалежні.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Модель прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників використання корисного компоненту, пов'язаного з магнетитом у методі [3–5] будується за вихідними даними  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , або за перекрученими, якщо ряд вмісту якісних показників корисних копалин не є стаціонарним. Рівняння моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (1)$$

де  $X_t = C_t - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n C_t$ ;  $\varphi_i$  – параметри авторегресії;  $\theta_i$  – параметри ковзного середнього;  $\varepsilon_t$  – «білий шум» з постійною дисперсією прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі.

Процес обчислення моделювання динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин пов'язаний з визначенням величин  $p$  і  $q$ , оцінкою параметрів моделі  $\varphi_i$  в  $\theta_i$  і діагностичної перевірки моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі на адекватність. Основним інструментом для ідентифікації моделі прогнозування служать автокореляційна і частинна автокореляційна функції. Властивості автокореляційної функції процесу конкретного виду дозволяють ідентифікувати порядок ковзного середнього  $q$ . Аналогічним чином ідентифікується порядок авторегресії  $p$  виходячи з властивостей частинної автокореляційної функції [6–8].

**Постановка завдання.** Оцінка моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі здійснюється у два етапи. Спочатку знаходяться початкові оцінки параметрів авторегресії і ковзний середній незалежно один від одного. При цьому початкова оцінка параметрів  $\Phi_i$  визначається з рівнянь Юла-Уоркера [2]. Параметри ковзного середнього  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  знаходяться за допомогою простої ітеративної процедури. Для моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин більш високого порядку скористаємося алгоритмом Марквардта, а для нелінійного методу – метод найменших квадратів [9–11]. Після того як знайдені оцінки параметрів моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі, які забезпечують мінімальні похибки рівняння моделі характеристик об'ємно-якісних ознак виконується для прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі.

**Викладення матеріалу та результати.** Початкові оцінки параметрів моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі є досить наближеними. Оцінка моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі, яка приводить до більш точного прогнозування, здійснюється за допомогою мінімізації суми квадратів розбіжностей між реальними членами динамічного ряду і прогнозів, які зроблені на попередньому кроці. Мінімум цієї суми визначає «справжні» значення параметрів змішаної моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин авторегресії ковзного середнього позначається АРКС ( $p, q$ )

$$S(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q) = \sum_{t=M}^n \tilde{\varepsilon}_t^2 = \min, \quad (2)$$

$$\text{де } \tilde{\varepsilon}_t = X_t - \sum_{l=1}^p \Phi_l X_{t-l} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}.$$

Для знаходження мінімуму функції  $S$  моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин авторегресії ковзного середнього розроблені різні методи. У випадку ( $p=0;1$  і  $q=0;1$ ) мінімум найпростіше знайти графічно. Для моделей третього і більш високого порядку використовується алгоритм Марквардта, а для нелінійного – метод найменших квадратів або його модифікації [12]. Після того як знайдені оцінки параметрів моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі, які забезпечують у середньому мінімальні похибки прогнозу, рівняння моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак буде використане для прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі. Маючи на увазі, що підібрана модель прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі є неадекватною реальному динамічному ряду вмісту якісних показників корисних копалин. Це обумовлено неправильною ідентифікацією порядків моделі  $p$  і  $q$  або не стаціонарністю вихідних даних. Стаціонарність вихідних даних знаходимо по поводженню автокореляцій. Якщо автокореляції мають тенденцію зберігати постійні значення, то динамічний ряд вмісту якісних показників корисних копалин, який досліджується не є стаціонарним [13–15]. У цьому випадку динамічний ряд вмісту якісних показників корисних копалин необхідно перевернути, взявши перші різниці, а при необхідності і різниці більш високого порядку, перейшовши до нового динамічного ряду

$$W_t = C_t - C_{t-1}, t = 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

Модель прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників різницевого динамічного ряду корисних копалин є змішаною моделлю прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин авторегресії проінтегрованого ковзного середнього позначається АРІКС ( $p, d, q$ ), де  $d$  – порядок взяття різниць. Як показують чисельні розрахунки по сотнях динамічних рядів вмісту якісних показників залізорудної маси для дільниць рудного тіла і покладів родовищ Кривбасу, порядки моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі  $p$  і  $q$  не перевищує 2, а порядок взяття різниць  $d$  дорівнює 0 або 1. Перевірка адекватності знайденої моделі прогнозування характеристик природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників використання корисного компонента, пов'язаного з магнетитом у надрах, здійснюється за допомогою діагностичних перевірок, використовуючи статистику  $X^2$ . Якщо діагностична перевірка приводить до неадекватності моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин процес оцінки повторюється, змінивши порядок моделі. При використанні комп'ютерних технологій для знаходження параметрів моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі процедура оцінки спрощена. Враховуючи, що  $p \leq 2$  і  $q \leq 2$ , послідовно оцінюється параметр конкуруючих моделей прогнозування з різними  $p$  і  $q$  і вибирається та з них, для якої  $S$  мінімальна [16]. Потім здійснюється діагностична перевірка тільки для цієї моделі прогнозування. Незважаючи на успішне вирішення теоретичних питань [1; 2; 8–10] у цій області, залишаються ще труднощі практичної реалізації методу, які обумовлені складністю оцінки параметрів таких багатовимірних моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі і інтерпретації результатів моделювання вмісту якісних показників корисних копалин. Однак аналіз використання багатовимірних моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі на вели-

кому фактичному матеріалі дає обнадійливі результати. Для моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин використано два підходи. Перший з них пов'язаний з побудовою адаптивних моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі множинної регресії, другий – з побудовою дискретних лінійних моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі, передаточних функцій та критерію стійкості [2; 17; 18]. Побудова адаптивних моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі множинної регресії виконується на припущенні про лінійну залежність динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $Y_t$ , який досліджується з динамічними рядами  $X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{M,t}$ , причому коефіцієнти зв'язку не є постійними. Допустивши, що прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі на момент часу  $t+\tau$  здійснюється за допомогою рівняння множинної регресії

$$\tilde{Y}_{t+\tau} = \lambda_{1,t} X_{1,t} + \lambda_{2,t} X_{2,t} + \dots + \lambda_{M,t} X_{M,t}. \quad (4)$$

Корегування вагових коефіцієнтів  $\lambda_{i,t}$  здійснюється за правилом, яке використано в методі адаптивної авторегресії [4; 19]

$$\lambda_{i,t} = \lambda'_{i,t} + 2k\varepsilon_{t+\tau} X_{i,t}; \quad (i=1,2,\dots, M),$$

де  $\varepsilon_{t+\tau} = Y_{t+\tau} - \tilde{Y}_{t+\tau}$  – похибки прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі;  $\lambda'_{i,t}$  – це значення  $\lambda_{i,t}$ , яке отримане на попередньому кроці;  $k = \alpha / 2 \sum_{i=1}^M X_{i,t}^2$  коефіцієнт адаптації;  $\alpha$  – параметр адаптації, причому  $0 < \alpha < 2$ .

Оптимальне значення  $\alpha$  знаходиться, як і у методі адаптивної авторегресії в процесі «навчання» моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі. На початковому етапі будується звичайна модель прогнозування методом найменших квадратів.

Другий підхід до моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин пов'язаний з узагальненням методу Бокса-Дженкінса для ізольованих динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Розглядаючи методику побудови моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі, обмежуючись для простоти двома взаємозалежними динамічними рядами вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$  і  $Y_t$  [20; 21]. Якщо  $Y_t$  і  $X_t$  – відхилення членів динамічних рядів від деякого зрівноваженого рівня відповідно на виході і вході динамічної системи. Рівняння моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі характеристики ознак авторегресії ковзного середнього буде мати вигляд

$$Y_t - \delta_1 Y_{t-1} - \dots - \delta_r Y_{t-r} = \omega_0 X_{t-b} - \omega_1 X_{t-b-1} - \dots - \omega_s X_{t-b-s}, \quad (5)$$

де  $\delta_i$  і  $\omega_j$  – «лівобічні» та «правобічні» параметри моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородній масі;  $b$  – «параметр затримки».

Використавши зрушення «назад»  $BY_t = Y_{t-1}$ ;  $B^2 Y_t = Y_{t-2}$  рівняння (5) запишеться у вигляді

$$(1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r) Y_t = (\omega_0 - \omega_1 B - \dots - \omega_s B^s) X_t, \quad (6)$$

або в більш компактному виді

$$Y_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_{t-b}, \quad (7)$$

де введені позначення  $\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r$ ;  $\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \dots - \omega_s B^s$ .

Функція

$$\nu(B) = \frac{\omega(B)}{\delta(B)}, \quad (8)$$

є передаточною функцією моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі авторегресії ковзного середнього [22, 23]. Враховуючи, що будь-яка динамічна система піддається збурюванню  $N_t$ , рівняння моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі (7) запишеться у вигляді

$$Y_t = \nu(B)X_{t-b} + N_t. \quad (9)$$

Процедура ідентифікації моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі містить у собі моделювання динамічного ряду  $X_t$ , зрівняння спектрів обох динамічних рядів, оцінку автокореляцій зрівняного виходу і взаємних кореляцій зрівняних входу і виходу, оцінку функції відгуку на одиничний імпульс і виділення випадкового компонента  $N_t$  [24–26]. Зрівнювання спектрів динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$  і  $Y_t$  здійснюється за формулами

$$\alpha_t = X_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j a_{t-j}; \quad \beta_t = Y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \beta_{t-j}, \quad (10)$$

де  $\Phi_i$  і  $\theta_i$  – параметри моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин авторегресії ковзного середнього, які отримані в результаті моделювання динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$ .

Для перекручених динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин  $\alpha_t$  і  $\beta_t$  по стандартним формулам знаходиться оцінка автокореляцій  $r_{\beta\beta}(k)$  і взаємних кореляцій  $r_{\alpha\beta}(k)$ , а також оцінки функції відгуку на одиничний імпульс

$$\tilde{\nu}_k = \frac{\tilde{\sigma}_\beta}{\tilde{\sigma}_\alpha} \tilde{r}_{\alpha\beta}(k), \quad (11)$$

де  $\tilde{\sigma}_\beta^2$  і  $\tilde{\sigma}_\alpha^2$  – оцінки дисперсій відповідно  $\beta_t$  і  $\alpha_t$ .

Отриманні на цьому етапі оцінки  $\tilde{\nu}_k$  статистично неефективні, але дозволяють ідентифікувати порядок операторів  $\delta(B)$  і  $\omega(B)$ , а також величину затримки  $B$  [24–26]. Ідентифікація параметрів  $r$ ,  $s$  і  $b$  ґрунтується на теоретичних властивостях функції відгуку  $\tilde{\nu}_k$  в рівнянні (11) моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин. Після того як ідентифіковано порядок моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі відновлюється випадкова складова модель  $N_t$  за допомогою рівняння

$$N_t = Y_t - \tilde{\nu}_0 X_t - \tilde{\nu}_1 X_{t-1} - \dots - \tilde{\nu}_g X_{t-g}, \quad (12)$$

і за стандартною методикою [25–27] будується модель прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі динамічного ряду  $N_t$ . Якщо при цьому отримана модель прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин авторегресії ковзного середнього має вигляд АРКС  $(p, q)$ , то модель взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин запишеться за формулою

$$Y_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_{t-b} + \frac{\theta(B)}{\Phi(B)} \varepsilon_t, \quad (13)$$

де  $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ ;  $\Phi(B) = 1 - \Phi_1 B - \Phi_2 B^2 - \dots - \Phi_p B^p$ .

Початкові оцінки «лівобічних» параметрів моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин передаточної функції  $\delta_i$  моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин авторегресії ковзного середнього знаходиться з вирішення системи лінійних рівнянь

$$\sum_{i=1}^r A_{ij} \tilde{\delta}_i = h_j; \quad j = 1, 2, \dots, r, \quad (14)$$

$$\text{де } h_j = \tilde{v}_{b+s+j}; \quad A_{ij} = \begin{cases} \tilde{v}_{b+s+i-j} & s+i \geq j \\ 0 & s+i < j \end{cases}$$

Початкові оцінки «правобічних» параметрів моделі прогнозування визначаються за формулами

$$\tilde{\omega}_0 = \tilde{v}_b; \quad D_{ij} = \tilde{\delta}_i \tilde{v}_{b+j-i} - \tilde{v}_{b+j}; \quad \tilde{\omega}_j = \sum_{i=1}^j D_{ij}; \quad \text{при } r \geq s; \quad \tilde{\omega}_j = \begin{cases} \sum_{i=1}^j D_{ij}, & j \leq r; \\ \sum_{i=1}^r D_{ij}, & j > r; \end{cases} \quad \text{при } r < s. \quad (15)$$

Попередні оцінки параметрів  $\delta_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\Phi_k$  і  $\theta_t$  надалі використовуються для одержання прогнозів і порівняння з фактичними даними. Остаточна оцінка моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі і діагностична перевірка на адекватність здійснюється так як і для ізольованих динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. При використанні комп'ютерних технологій розрахунок здійснюється за стандартними програмами.

Розглядаються питання про побудову і використовується для прогнозування агрегованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин на підставі динамічних рядів з невеликими інтервалами дискретності. Такий підхід правомірний, якщо число членів динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин досить велике, щоб одержати надійні статистичні оцінки параметрів мінливості. Вирішення питань здійснюється, якщо такі ряди розглядаються як агреговані, що утворенні даними динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин меншої дискретності. Припустивши, що для динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $C'_i$  з деяким мінімальним інтервалом дискретності  $t_0$  (змiна, доба) число даних досить велике. Розглядається завдання визначення статистичних характеристик агрегованих рядів  $C_n$ , які отримані з основного ряду  $C_i$  за допомогою перекручення

$$C_k = (C'_{k(m-1)+1} + C'_{k(m-1)+2} + \dots + C'_{km}) / m \quad \text{або} \quad C_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C'_{k(m-1)+j}. \quad (16)$$

Якщо  $t_0$  дорівнює одній добі, то при  $m=1$  одержується динамічний ряд вмісту якісних показників корисних копалин  $C_n$  середньотижневих значень показника  $C$ . У найпростішому випадку взаємозалежних  $C'_i$  всі характеристики динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $C_n$  знаходяться за допомогою формул класичної математичної статистики

$$M(C) = M(C') = \bar{C}; \quad D(C) = \frac{D(C')}{m}.$$

У випадку, коли динамічний ряд вмісту якісних показників корисних копалин  $C'_i$  є стаціонарним, знаходиться зв'язок між характеристиками динамічних рядів  $C'_i$  і  $C_k$ . Для математичного очікування –  $M(C) = M(C')$ . Для визначення дисперсії  $D(C)$  і автокореляційної функції  $K_C(l)$  скористаємося властивостями підставляючи (16) у відповідні вирази для дисперсії і автокореляційної функції і після перетворень отримується

$$D(C) = \frac{2}{m} + D(C') + \frac{2}{m} \sum_{r=1}^{m-1} (m-r) K_{C'}(r); \quad (17)$$

$$K_C(l) = \frac{1}{m} \sum_{r=-(m-1)}^{m-1} \left( 1 - \frac{|r|}{m} \right) K_{C'}(lm - r). \quad (18)$$

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Отримані теоретичні залежності рекомендовано для побудови агрегованих рядів, якщо відомі характеристики вихідного основного динамічного ряду об'ємно-якісних ознак вмісту якісних показників корисних копалин. Викладений підхід розширює можливості методу прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі, що дозволяє вірогідно оцінити контрольовані характеристики на періодах управління перевищуючи оперативні, підвищуючи при цьому точність прогно-

зування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин. Основними перевагами моделі прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізородної масі є її високі адаптивні властивості, висока точність прогнозування, а також можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Досягається це за рахунок ефективного статистичного аналізу інформації.

#### Список літератури

1. Аврамов В. Е., Азбель Е. И., Ефремова Н. И. (1979). Планирование эксперимента и прогнозирование качества сырья на горных предприятиях. Новосибирск, Наука.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. (1974). Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М., Мир.
3. Гудков В. М., Васильев В. М., Николаев К. П. (1976). Прогноз и планирование качества полезного ископаемого. М., Недра.
4. Новые направления в маркшейдерии. Монография. (2010). / Сидоренко В. Д., Федоренко П. И., Шолох Н. В., Переметчик А. В. – Кривой Рог: Издательский центр КТУ. – 265 с.
5. Шолох Н. В. (2007). Оптимизация вскрытых запасов руды и направления горных работ в карьере. / Вісник КТУ. – Випуск № 16. – Кривий Ріг. – КТУ. – С. 42–44.
6. Шолох Н. В. (2005). Прогнозирование показателей геохимического поля месторождений железистых роговиков Кривбасса. / Разработка рудных месторождений. – Выпуск № 89. – Кривой Рог. – С. 144–147.
7. Шолох Н. В. (2002). Программный модуль оптимизации промышленных запасов на глубоких железорудных карьерах. / Качество минерального сырья. – Кривой Рог. – С. 290–293.
8. Шолох М. В. (2016). Методика визначення і нормування вмісту якісних показників корисних копалин у промислово-балансових запасах. – Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ». – 160 с. Іл.
9. Шолох Н. В. (2005). Прогнозирование показателей геохимического поля месторождений железистых роговиков Кривбасса. / Разработка рудных месторождений. – Выпуск № 89. – Кривой Рог. – С. 144–147.
10. Шолох М. В., Сергеева М. П., Топчий О. Л. (2010). Визначення мінімального об'єму для усереднення рудної сировини. / Зб. наукових праць «Вісник КТУ». – Кривий Ріг. – Вип. 25. – С. 68–72.
11. Шолох Н. В., Топчий А. Л. (2014). Формирование качества полезного ископаемого и рудного сырья горно-рудных предприятий Кривбасса. / Збірник наукових праць «Гірничий вісник». – Науково-технічний збірник ДВНЗ «КНУ», – Випуск № 97. – Кривий Ріг. – 2014. – С. 26–30
12. Sholokh M. V. (2017). Methodology for the standardization losses of ready-to-extract solid minerals. / For participation in the 2nd International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative Development of Mining Industry». December 14, 2017, Kryvyi Rih. – 179.
13. Sholokh M. V., Sholokh S. M., Sergieieva M. P. (2018). An analysis of surveyor control of losses of balance-industrial supplies is at mastering of bowels of the Earth. 415–438. / Innovative development of resource-saving technologies for mining. Multi-authored monograph. – Sofia: Publishing House «St. Ivan Rilski», 2018. – 439 p. ISBN 978-954-353-351-0.
14. Шолох М. В., Сергеева М. П. (2017). Економічна оцінка втрат балансово-промислових запасів і засмічення вмісту якісних показників корисних копалин у залізородній масі. / Зб. наукових праць «Вісник КНУ». – Кривий Ріг, – Вип. 102. – С. 51–56.
15. Шолох М. В. (2017). Нормування балансово-промислових запасів залістистих кварцитів по ступеню підготовленості до видобування відкритим способом. / Науково – техн. збірник «Гірничий вісник» ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг, – Вип. 45. – С. 172–178.
16. Шолох М. В. (2017). Нормування готових до видобування балансово-промислових запасів залістистих кварцитів при відкритому способі. / Сб. научных трудов «Качество минерального сырья». – ФАП Черняховский Д. А. – Кривой Рог. – С. 471–478.
17. Шолох М. В. (2018). Вплив втрат балансово-промислових запасів і збіднення вмісту якісних показників корисних копалин на процес усереднення. / Зб. наукових праць ДВНЗ «КНУ» «Гірничий вісник» Науково-технічний збірник: Кривий Ріг, – Вип. 103. – С. 50–55. ISSN 2306-5435.
18. Шолох М. В. (2018). Маркшейдерське забезпечення прогнозування і управління якісними показниками при розробці залізородних родовищ. – С. 160–168. / Форум гірників–2018: матеріали міжнар. конф., 10–13 жовтня 2018 р. – Дніпро: Середняк Т. К. – 307 с. ISBN 978-617-7696-55-0.
19. Шолох М. В., Сергеева М. П. (2018). Моделирование характеристик об'ємно-якісних показників потоків залізородної маси кар'єрів і шахт. / Зб. наукових праць ДВНЗ «КНУ» «Гірничий вісник» Науково-технічний збірник: Кривий Ріг, 2018. – Вип. 103. – С. 17–22. ISSN 2306-5435.
20. Шолох М. В. (2018). Нормування балансово-промислових запасів залістистих кварцитів по ступеню підготовленості до видобутку. – С. 742–761. / The Second International scientific congress of scientists of Europe. – Proceedings of the II International Scientific Forum of Scientists «East–West» (May 10–11, 2018). Premier Publishing s. r. o. Vienna. 2018. 822 p. ISBN–13 978-3-903197-91-6; ISBN–10 3-903197-91-2.
21. Sholokh M. V., Sergieieva M. P. (2018). Taking into account of amount and quality of attracted in the booty of balanced on maintenance quality indexes minerals of supplies. – С. 29–32. / International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative Development of Resource-Saving Technologies of Mineral Mining and Processing». Book of Abstracts. – Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, –221 p. ISBN 978-973-741-615-5 (print).

22. Шолох Н. В. (1999). Горно-геометрический мониторинг прогнозирования качественных показателей железорудных месторождений. / Сб. научных трудов второго международного симпозиума «Оперативный контроль и управление качеством минерального сырья при добыче и переработке». – Ялта. – С. 218–220.
23. Шолох Н. В. (2005). Прогнозирование показателей геохимического поля месторождений железистых роговиков Кривбасса. / Научно – техн. сборник «Разраб. рудн. месторождений». – Кривой Рог. – Вып. 89. – С. 144–147.
24. Шолох М. В., Топчий О. Л. (2012). Прогнозування якісних показників руд та порівняння їх ефективності. / Науково – техн. збірник «Гірничий вісник». – Кривий Ріг. – Вип. 95(1). – С. 78–82.
25. Шолох М. В., Топчий О. Л., Сергєєва М. П. (2013). Моделювання відосблених і взаємозалежних динамічних рядів для прогнозування якісних показників корисної копалини. / Зб. наукових праць «Вісник КНУ». – Кривий Ріг. – Вип. 35. – С. 55–60.
26. Шолох М. В., Топчий О. Л., Сергєєва М. П. (2013). Моніторинг прогнозування показників корисної копалини родовища на основі стохастичного моделювання відосблених і взаємозалежних динамічних рядів. / Сб. матеріалів міжнародної науково – техн. конференції. – Донецьк: ДонНГУ. – Вып. 3. – С. 47–52.
27. Шолох М. В. (2016). Моделювання динамічних рядів прогнозування якісних показників руди і корисної копалини у рудній сировині. / Науково – техн. збірник «Гірничий вісник» ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг. – Вип. 101. – С. 49–55.

Рукопис подано до редакції 10.04.2019

УДК 622.235

А.Ю. АНТОНОВ, Ю.С. МЕЦ, П.И. ФЕДОРЕНКО, доктора техн. наук, профессора  
Криворожский национальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО МИКРОСЕКУНДНОГО ВЗРЫВАНИЯ

**Цель.** Установление зависимости качества дробления от эффекта усталости горных пород при многократно повторяющихся взрывных нагрузках.

**Методы исследований.** Проведенные теоретические изыскания и анализ циклического воздействия нагрузок механического характера на образцы различных горных пород подтвердили актуальность лабораторных исследований и дальнейшего промышленного эксперимента по изучению влияния многократных взрывных нагрузок и иницируемого ими эффекта усталости на прочностные свойства пород и качественные показатели разрушения.

**Научная новизна.** Изучен механизм циклического взрывного нагружения различной интенсивности, установлен экстремальный характер влияния взрывной усталости на качество дробления горных пород, получены новые возможности для разрушения массива.

**Практическое значение.** Решения, явившиеся результатом настоящих исследований, позволяют использовать эффект усталости горных пород при проектировании и проведении взрывных работ. Предложенные вариации использования данного эффекта практически не усложняют работы по монтажу взрывной сети, а дополнительные расходы будут минимальными. Использование эффекта усталости позволяет увеличить величину вновь образованной свободной поверхности и, соответственно, улучшить качество дробления при постоянных удельных расходах ВВ, а без повышения качества дробления можно существенно снизить энергозатраты на разрушение горных пород.

**Результаты.** Установлены зависимости качества дробления от числа циклов неразрушающего нагружения. При этом доказано наличие оптимального количества циклов, при которых эффект усталости наиболее эффективен. Так, дроблению способствует начальная стадия явления усталости (процесс разупрочнения), когда из общей массы микротрещин еще не начался рост крупных трещин. Насыщенные микротрещинами породы легче и «качественнее» разрушаются на отдельности при взрывании основных зарядов. Вновь образованная поверхность на 30% больше, чем при взрывном разрушении без предварительного нагружения. Установлено, что максимальный результат достигается при повышенных удельных расходах ВВ с использованием малых интервалов замедлений (500-2500 мкс) между скважинами в ряду или встречно-направленным развитием взрыва между скважинами ряда или смежных рядов. Промышленные эксперименты подтвердили полученные зависимости для оптимизации нагрузок на разрушаемые породы с целью улучшения качества дробления. Реализация эффекта взрывной усталости при производстве массовых взрывов осуществлена на ряде карьеров Кривбасса. Установлено снижение выхода крупных классов (+400мм) в 1,5 раза и уменьшение диаметра среднего куска на 35%.

**Ключевые слова:** горные породы, взрывное нагружение, эффект усталости, циклические нагрузки, динамика разрушения.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-99-103

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Явление усталости в различных исследованиях рассматривалось как вредное, уменьшающее прочность целиков, опор и т.д. Поэтому конечной целью таких работ была разработка мер, снижающих этот эффект или учитывающих его. Испытание состояния объекта после разрушения не вели. В нашем случае