

закономірностями зміни коефіцієнта запасу стійкості від ступеня підроблення борту підземними гірничими роботами.

Висновки і напрямок подальших досліджень. Встановлені закономірності зміни коефіцієнта запасу стійкості східного борту Глеєватського кар'єра від збільшення ступеня техногенного порушення прибортового масиву вірогідним виходом вирв вторинного обвалення дозволили визначити граничні значення ступеня порушення прибортового масиву ($K_{пр} = 10-76\%$), при якому стійкість східного борту Глеєватського кар'єра буде відповідати нормативним вимогам.

Враховуючи прогностичний характер вихідної інформації, опис і систематизація таких дефектів у просторі - складне завдання, яке потребує розроблення спрощених моделей і припущень. За допомогою кластерного аналізу можливо створення моделей, які врахують складність просторової організації реальної геомеханічної системи. Для цього потрібно задати функцію розподілу зон вирвоутворень за їх характеристичними розмірами і фізико-механічними властивостями. Звичайно, ця функція має зміст функції розподілу ймовірності поділу борта кар'єру на об'єми вторинних зрушень при заданих деформаційних параметрах. На наш погляд, використання кластерного аналізу для контролю стану стійкості бортів кар'єрів і відвалів є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого сприяє підвищенню обґрунтованості геомеханічних прогнозів стійкості бортів кар'єра та формалізації пошуку оптимальних рішень. Розроблення кластерної моделі буде складовою частиною подальших досліджень авторів.

Список літератури

1. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. – Київ: МППУ. - 2008. - 702с.
2. Выявление пустот в восточном борту Глеватского карьера и разработка мероприятий по безопасному ведению горных работ в зонах его подработки подземными горными работами: Отчет по НИР (заключ.) / Министерство промышленной политики Украины ГП «НИГРИ» № ГР 0111U004428; - Кривий Ріг, 2011. - 85 с.
3. Открытые горные работы: Спр. / **К.Н.Трубецкой, М.Г. Потапов, Н.Н. Мельников и др.** - М.: Горное бюро, 1994. - 590 с.
4. Комп'ютерна програма «Комплекс комп'ютерних програм «РЕПЕР»: Свідчення про реєстрацію авторського права на твір. Україна, МОНУ/С.Я. Бехлер, А.В. Болотников, С.О. Несмашний, О.В. Максимов, Г.І. Ткаченко. – № 39943; Зареєстр. 02.09.11.
5. **Попов В.Н., Байков Б.Н.** Технология отстройки бортов карьеров / М., Недра, 1991. - 250 с.
6. **Зотеев.В.Г.** Основные проблемы формирования предельных контуров карьеров в скальных породах: Сб. научн. тр. - Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1987.- №83.- С. 8-15.

Рукопис подано до редакції 12.11.11

УДК 622.142.5:553.31

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

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОДОВИЩА ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЗАЦІЇ ЙОГО ЗАПАСІВ

Надано методику, яка базується на основі даних детальної розвідки з використанням сучасних математичних методів, що дозволяють урахувати не тільки особливості розподілу корисного компонента на даному родовищі, але і методику проведення геометризації для уточнення промислових запасів.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Для об'ємів, які відповідають розмірам проб, Д. Кріге розробив метод оцінки вмісту в даній точці шляхом усереднення вмістів в найближчих опробованих точках з вагами, які зменшуються по мірі збільшення відстані від розглядаємої точки [1,2]. Цей метод отримав назву крайгінга. Для застосування крайгінга необхідно було в першу чергу по даним опробування оцінити кореляційну функцію (або варіограму). Від правильності її оцінки залежить точність підрахунку запасів. У зв'язку з цим були розглянуті питання зміни цих функцій в залежності від геометрії проб, орієнтації ліній опробування по відношенню до рудного тіла і інш. Де Війсом були запропоновані емпіричні формули для обліку впливу геометрії проб на вид цих функцій, але ефективність їх використання залишилась спірною. Разом з тим, це питання суттєво впливає на рішення задач крайгінга. У більш загальному вигляді воно може бути поставлене, як вивчення вида цих функ-

цій і гістограм вмістів $Fv(c)$ в залежності від зміни об'єму, в межах якого оцінюється вміст. Однозначного рішення ці питання не мають, а названі проблеми залишаються невіршеними по сьогодні. Але, перелічені вище уявлення послужили передумовою для розвитку комп'ютерних технологій побудови математичних моделей родовищ.

Аналіз досліджень та публікацій. Основи математичного моделювання родовищ були закладені в середині ХХ ст. В.М. Крейгером, Д. Кріге, Ж. Матероном, М. Давідом та ін. [1-4]. У більшості цих робіт вміст металу в будь-якому об'ємі надр $V(x,y,z)$, що знаходиться в межах рудного тіла, розглядався як величина випадкова, яка до проведення вичерпного опробування може бути оцінена лише з деякою вірогідністю. При цьому, можна задати розподіл вірогідностей $Fv(c)$, які відповідають різним по величині значенням цього вмісту, а величину об'єму $V(x,y,z)$ - прийняти від'ємною - від об'єма проби (або її частини) до об'єма блока і т.ін.

Постановка завдання. Математична модель родовища є базовим елементом методу оцінки кондицій і підрахунку запасів, тому що на її основі виконується геометризація запасів (побудова підрахункових блоків), знаходиться оптимальне положення контурів кар'єру, проводиться (з урахуванням коефіцієнта рудоносності) підрахунок запасів при різних бортових вмістах і т.ін. Трохи спрощуючи, можна сказати, що математична модель родовища при рішенні багатьох завдань техніко-економічного обґрунтування кондицій і підрахунку запасів заміняє базу первинних даних розвідницького опробування, на основі якої вирішуються аналогічні завдання при традиційному «ручному» методі підрахунку запасів.

Викладення матеріалу та результати. В основі побудови математичної моделі запасів лежить подання про закономірності розподілу концентрацій корисного компонента в об'ємі надр. Цей розподіл залежить від геолого-геохімічних особливостей процесу рудоутворення, властивості структури вміщуючих порід, а також від геометрії проб, за допомогою яких ведеться вивчення зазначеного об'єму. Упорядкована безліч концентрацій хімічних елементів у надрах C , розглянуте як функція просторових координат x прийнято називати геохімічним полем

$$C = F(x), \quad (1)$$

де x - вектор координат.

У переважній більшості робіт таке поле розглядається як випадкова функція просторових координат, для якої в кожному локальному об'ємі (або точці відбору проби) може бути зазначений розподіл ймовірностей її значень $F(c, v_{i,j,k})$ (вмістів корисного компонента), а у більшості практичних додатків, пов'язаних з розвідкою і оцінкою запасів родовищ, завдання відновлення такого розподілу ймовірностей не ставиться, і все зводиться до більш вузького завдання відшукування оцінки математичного очікування цієї функції, тобто до середнього вмісту C корисного компонента в об'ємі V_{ijk}

$$C = M [F(c, v_{ijk})]. \quad (2)$$

Така оцінка виходить шляхом підсумовування значень вмістів в навколишніх точках опробування і глобального середнього з вагами λ

$$c(x) = \lambda_{oM} + \sum \lambda_{ic}(x_i), \quad (3)$$

де $c(x)$ - оцінка вмісту в точці x (x у загальному випадку тривимірний вектор), M - глобальне середнє, $c(x_i)$ - значення вимірних вмістів у точках опробування, а ваги λ і ($i=1, n$) знаходяться шляхом рішення системи нормальних рівнянь

$$\lambda K = k, \quad (4)$$

де λ - невідомий фактор ваг; K - матриця, складена зі значень кореляційної функції між точками x_i, x_j, k - вектор, складений зі значень кореляційної функції між поточною точкою x і точками опробування x_i ,

$$\lambda_o = 1 - \sum \lambda_{i(i=1, n)}. \quad (5)$$

Процедура крайгінга (з різними її модифікаціями) лежить в основі алгоритмів, що використовуються у більшості комп'ютерних технологій побудови математичних моделей.

Відмітною ознакою даної технології побудови математичної моделі родовища, є відновлення для кожного об'єму надр V_{ijk} самого розподілу ймовірностей $F(c, v_{ijk})$, а не його математичне очікування. Рішення цього завдання базується на запропонованому Канцелем і Червоненкісом поданні геохімічного поля концентрацій (1) у вигляді добутку двох (або декількох) функцій різного масштабу мінливості

$$F(x) = f(x) \cdot \zeta(x) \quad M[f(x)] = M[F(x)] \quad (6)$$

$$M[\zeta(x)] = 1; \quad f(x) \geq 0, \quad \zeta(x) \geq 0,$$

де $f(x)$ - функція, що плавно змінюється, яка відбиває тенденції в збільшенні або зменшенні концентрацій; $\zeta(x)$ - шумоподібна складова, що характеризує локальні варіації корисного компонента; M - символ математичного очікування.

При такому поданні розміщення корисного компонента в надрах можна розглядати як випадкову функцію (1), значеннями якої в кожному локальному об'ємі (x) є функції розподілу, параметри яких - $M(x)$, $D(x)$ і ін. - залежать від $f(x)$, а ймовірності конкретних значень задаються високочастотним процесом $\zeta(x)$, керованим (або моделюємим) низькочастотною функцією $f(x)$.

Стосовно до інтерпретації результатів опробування родовища по будь-якій мережі, у поле концентрацій $F(x)$ можна виділити складову $f(x)$, радіус кореляції якої перевищує крок мережі опробування і складову, радіус кореляції якої досить малий у порівнянні із кроком $\zeta(x)$.

Значення першої складової можна інтерполювати між точками мережі, а значення другої не можна. Тому в окремих локальних об'ємах V_{ijk} ми будемо мати можливість оцінити лише параметри розподілу ймовірностей тих або інших концентрацій корисних компонентів, але не самі значення цих концентрацій.

При цьому, залежно від характеру поля $F(x)$ і його структури, буде існувати величина V_0 , нижче якої оцінка параметрів розподілу буде нестійкою. У цьому випадку для локальних об'ємів надр $V_{ijk} \geq V_0$ буде існувати оцінка розподілу ймовірностей $P(C, V_{ijk})$, параметри якого (M, D) корелюємі з результатами опробування свердловин, що оточують об'єм V_{ijk} і можуть бути оцінені з використанням останніх, а ймовірності окремих значень концентрацій (у вигляді гістограм) потребує спеціального алгоритму. Опис цього алгоритму, становить ядро даної технології побудови математичної моделі.

Отже, розглядаючи поле концентрацій корисного компонента як випадкову функцію просторових координат, ми приходимо до наступного формулювання завдання побудови математичної моделі родовища. Дано випадкову функцію просторових координат $F(x)$, що має мультиплікативну структуру в тому вигляді, як це зазначено в (6). Передбачається, що високочастотні складові $\zeta(x)$ модулюються низькочастотними складовими по амплітуді. Функція $F(x)$ представляє собою поле концентрації одного або декількох корисних компонентів, і конкретна реалізація цієї функції $F^*(x)$ визначає, у деякому об'ємі надр, V досліджуваного родовища. В окремих точках простору з індексами (i, j, k) визначені значення F^*_{ijk} у вигляді вмістів корисного компонента в пробі (i, j, k) . Задано певний по технічних або іншим обставинам об'єм $V(i, j, k)$ - так званий осередок моделі надр; родовище представлено як тривимірна матриця, що складається з таких об'ємів у межах V . За даними опробування в деяких осередках можна оцінити розподіл ймовірностей вмістів корисного компонента $F^*(c, V_{ijk})$ у пробах, що належать зазначеної в (6) функції $F(x)$. Потрібно, користуючись значеннями F^* і властивостями $F(x)$, зазначеними в (1), побудувати оцінки розподілів F^* в інших об'ємах (осередках), що входять до складу матриці $V = \{V_{ijk}\}$. Тривимірна матриця зазначених осередків, у межах кожної з яких дані оцінки $F^*(c, V_{ijk})$ розподілів ймовірностей вмістів корисного компонента, розглядається як математична модель функції $F(x)$ і надалі називається математичною моделлю родовища.

Загальноприйнятого визначення поняття математичної моделі родовища поки що не існує. У більшості випадків під такою моделлю розуміють його подання у вигляді системи елементарних блоків, у кожному з яких визначена оцінка середнього вмісту корисного компонента. Розміри блоку можуть варіювати від розмірів осередку мережі буровибухових свердловин (якщо останні опробуються) до розмірів мережі детальної розвідки. Визначати елементарний блок моделі у вигляді осередку мережі буро-вибухових робіт логічно, тому що більш детальної селекції виконати неможливо.

У той же час вірогідно оцінити вміст металу в об'ємі осередку буро-вибухових робіт (за даними розвідувального опробування в більшості випадків не можна, тому що в подібних об'ємах визначальним компонентом є мінливість високого рівня, яка має слабку кореляцію з даними опробування розвідувальних свердловин.

Було викладено подання поля концентрацій у вигляді системи функцій розподілу величин вмістів корисного компонента в локальних об'ємах. Виходячи з цієї концепції, можна так визначити основні поняття, пов'язані з побудовою математичної моделі родовища.

1. Математична модель родовища являє собою систему (тривимірну матрицю) елементарних блоків (елементів), у кожному з яких заданий розподіл ймовірностей (гістограма) вмістів металу в елементарних об'ємах.

2. Осередками моделі називаються прив'язані в просторі прямокутні паралелепіпеди фіксованого розміру, з яких складена тривимірна матриця моделі, і кожному з яких приписаний розподіл ймовірностей вмістів корисного компонента (компонентів) по типах руд, обумовлене в елементарних об'ємах.

3. Елементарним об'ємом називається той об'єм надр для якого оцінюється вміст. Це може бути об'єм проби фіксованого діаметра і довжини, об'єм групи проб об'єднаних на висоту уступу або по заданих кондиціях, виймальний об'єм, що відповідає певному рівню селективності відпрацювання. При зміні елементарного об'єму (так звана зміна геометрії проб) змінюється і гістограма розподілу вмістів.

4. Зона мінералізації - область тривимірного простору, що оточує рудне тіло, у межах якої будується модель. Дані опробування, які залишились за межами зони мінералізації при побудові моделі не використовуються.

Алгоритм побудови математичної моделі складається з ланцюга процедур, кожна з яких представляється самостійним завданням, причому рішення окремих з них відрізняється істотною математичною новизною. До основних процедур відносяться: побудова границі зони мінералізації; вибір параметрів моделі; згладжування результатів первинного опробування; крайгінг гістограм; реалізація оператора переходу до нової системи опробування.

Визначення границь моделюемого поля концентрацій (границі мінералізованої зони).

При побудові математичної моделі передбачаються, що поле концентрацій корисного компонента займає локальний об'єм надр, обмежена тією областю простору, у якій відбувався процес мінералоутворення. Найбільш об'єктивними є границі мінералізованої зони, побудовані за даними геологічних спостережень і результатам опробування геологорозвідувальних свердловин.

Вибір параметрів моделі являє собою операцію, у підсумку якої визначаються: розміри елементів моделі; порог ураганих проб; шаг гістограм; параметри крайгінга; параметри оператора перетворення даних при зміні геометрії опробування.

Більшість із цих параметрів визначаються емпірично, виходячи з висоти уступу кар'єру, геометрії мережі свердловин і буро-вибухових робіт.

Згладжування результатів первинного опробування здійснюється шляхом середньозваженого усереднення даних опробування на відрізках свердловин між поверхнями окремих уступів.

Побудова гістограм розподілу металу для кожного елемента - крайгінг гістограм (рис. 1).

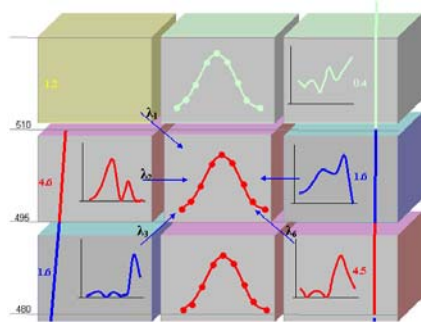


Рис. 1. Схема крайгінга гістограм

Для елементів моделі, у межах яких є дані опробування свердловин або інших розвідувальних виробок, побудова гістограм виконується звичайним способом.

Для тих елементів, де даних опробування не існує, здійснюється інтерполяція гістограм. У відмінності від традиційного підходу, нами пропонується новий метод - крайгінга гістограм, метою якого є не оцінка умовного середнього в поточній точці, а оцінка умовного розподілу вмістів у поточному об'ємі.

Оцінка виходить шляхом підсумовування з вагами λ і гістограм вмістів, накопичених, у найближчих елементах моделі за даними опробування розвідувальних виробок:

$$P(c(x)) = \sum \lambda_i P_i \quad (7)$$

де $P(c(x))$ - оцінка щільності розподілу вмістів у точці x , $P_i(x)$ - гістограми вмістів, оцінені в точках опробування, λ_i - ваги крайгінга. Вектор ваг λ знаходиться шляхом рішення системи нормальних рівнянь типу (4) і (5), де кореляційна функція характеризує вже не мінливість самих вмістів, а мінливість гістограм їхнього розподілу.

Фактичний середній вміст у кожній градації гістограми обчислюється шляхом усереднення середніх значень вмістів у відповідній градації гістограм із вагами пропорційними коефіцієнтам інтерполяції за формулою

$$C(x) = (\sum \lambda_i P_i C_i) / (\sum \lambda_i P_i) \quad (8)$$

У якості просторової кореляційної функції для крайгінга гістограм взята сума (з вагами) трьох кореляційних функцій з радіусами кореляції рівними відповідно до подвоєної висоти уступу, середній відстані між свердловинами в профілі і середній відстані між розвідувальними профілями.

Перетворення моделі при переході від результатів опробування геологорозвідувальної мережі до мережі експлуатаційних свердловин

По отриманим гістограмам вмістів у пробах (або інтервалах), ми оцінюємо запаси (у цілому або по окремих ділянках) відповідному тому рівню селективності, що досягається при обраній мережі опробування і методиці відбору проб. У цьому випадку - це мережа геологорозвідувальних свердловин, а у дійсності селективність відпрацювання визначається кроком мережі експлуатаційного опробування.

Для обліку цієї обставини пропонується наступна схема. Поле вмістів у об'ємах, що нас цікавлять, розглядається, як «сигнал» із середнім M і дисперсією D . Результат опробування C_{np} розглядається, як вимір «сигналу» із середнім рівним значенню сигналу дисперсією помилки d .

Тоді оптимальною оцінкою значення сигналу буде

$$C = \beta C_{np} + (1-\beta)M, \quad (9)$$

де

$$\beta = D/(D + d). \quad (10)$$

Вибором величини β можна забезпечити оцінку запасів для різних рівнів селективності відпрацювання. Дана процедура може бути використана як до, так і після крайгінга гістограм.

Оцінка запасів у будь-якому об'ємі, складеному з елементів моделі, або по всьому родовищу в цілому виконується на основі використання гістограм, які побудовані для кожного з елементів моделі описаним вище способом. Для заданого бортового вмісту c_δ сума ймовірностей вмістів, що перевищують бортове, трактується, як коефіцієнт рудоносності елемента k_p .

$$k_p = \sum p_i, \text{ для } i, \text{ при яких } c_i > c_\delta \quad (11)$$

де c_i - середини інтервалів гістограми, p_i - значення гістограми в цих інтервалах.

Середній вміст металу в руді елемента обчислюється по формулі

$$c = (\sum c_i p_i) / k_{C_j > C_\delta} \quad (12)$$

Запаси руди R в елементі обчислюються так

$$R = k_p q V, \quad (13)$$

де q - об'ємна щільність руди; V - об'єм елемента.

Запаси металу Z в елементі вважаються як

$$Z = R c \quad (14)$$

Запаси руди і металу в заданому об'ємі підраховуються як сума запасів у вміщуючих в ньому елементів моделі. Середній вміст в об'ємі - як відношення запасів металу до запасів руди.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Відмінністю даної моделі є використання функції розподілу ймовірності як об'єкт інтерполяції, і як характеристика кожного елемента згаданої моделі. Інші технології побудови таких моделей оперують із оцінкою середнього вмісту металу, у той час як дана методика базується на операціях з функцією, що характеризує ймовірність появи в даному об'ємі вмістів різної величини. Побудовану таким чином модель родовища може бути використано для підрахунку його запасів, оптимального проектування гірничовидобувного підприємства, а також довгострокового і середньострокового планування гірничих робіт на уже діючому підприємстві.

Список літератури

1. Букринский В.А. Геометрия недр. – М.: Недра, 1985. – 526 с.
2. Шолох Н.В., Переметчик А.В. Геометризация размещения качественных характеристик железистых кварцитов Кривбасса / Разраб. рудн. месторожд.: Кривой Рог: КТУ. – Вып. 86, 2004. – С. 44-47.
3. Шолох Н.В., Топчий А.Л. Направления развития системы обработки маркшейдерско-геологической информации. Кривбасса / Разраб. рудн. месторожд.: Кривой Рог: КТУ. – Вып. 93, 2010. – С. 94-97.
4. Шолох М.В., Топчий О.Л., Сергеева М.П. Визначення мінімального об'єму для усереднення рудної сировини / «Вісник Криворізького технічного університету». - Вип. 25. - Кривий Ріг, 2010. - С.68-72.

Рукопис подано до редакції 12.01.12

УДК 504.42: 519.872: 622.5