

## PROBLEMY ZASTOSOWAŃ METOD MATEMATYCZNYCH W GEOLOGII W ŚWIELE PRAC SYMPOZJUM GÓRNICZEGO W PRZYBRAMIE

UKD 55:[519.2+681.3]:002:[622:061.31(100)](437)"1971.10.18/25"

W dniach 18.X. — 25.X.1971 r. w Przybramie (CSRS) odbyło się Sympozjum Górnicze „Hornická Příbram ve vědě a technice 1971”. Jest to coroczne międzynarodowe sympozjum, którego zasięg wykracza w sensie merytorycznym poza nauki górnicze. Stało się tradycją, że tematem obrad jednej z sekcji są matematyczne metody w geologii. Przedstawiony poniżej artykuł jest jednocześnie sprawozdaniem z przebiegu obrad i ich merytorycznej treści, a także próbą podsumowania stanu badań i kierunków prac w dziedzinie zastosowania metod matematycznych w geologii.

Obradom sekcji „Matematické metody v geologii” patronowała IAMG (International Association of Mathematical Geology), której sekretarz dr Vaclav Nemeč był obecny w czasie prac sekcji. Oprócz autorów w pracach sekcji brał udział ze strony polskiej dr M. Nieć z AGH. W obradach uczestniczyli: Bułgaria, CSRS, Francja, NRD, NRF, Szwecja, USA, WRL, W. Brytania, ZSRR, Polska. Obecni na sympozjum specjaliści reprezentowali różne dziedziny geologii, byli to jednakże fachowcy w zakresie stosowania metod matematycznych i elektronicznej techniki obliczeniowej w naukach geologicznych.

### MERYTORYCZNA TREŚĆ OBRAD SEKCJI „MATEMATYCZNE METODY W GEOLOGII”

W czasie prac sekcji wygłoszono i przedyskutowano 19 referatów opracowanych zarówno przez specjalistów z CSRS, jak i zaproszonych fachowców zagranicznych. Referaty, jakkolwiek obejmowały wiele zagadnień, mogą być sklasyfikowane w trzech podstawowych grupach tematycznych:

- I. Zastosowanie metod matematycznych przy obliczaniu zasobów złoża, jego eksploatacji, a także przy analizie metod opróbowania.
- II. Zastosowanie metod matematycznych do: modelowania geologicznego, analiz strukturalnych, konstrukcji map geologicznych.
- III. Systemy tworzenia banku danych, „Geofond” oraz sposoby przetwarzania geologicznych informacji archiwalnych.

Poniżej omówiono skrótowo idee przedstawione przez autorów referatów z wymienionych grup tematycznych.

### OBLICZANIE ZASOBÓW ZŁOŻ

W dziedzinie obliczania zasobów złóż surowców stałych zaznacza się odwrót od klasycznych metod obliczania, opartych w głównej mierze na założeniu niezmienności budowy złoża w przestrzeni pomiędzy

wyrobiskami lub na przyjęciu liniowych metod interpolacji i ekstrapolacji. Metody te zdają egzamin przy obliczaniu zasobów złóż pokładowych o małej zmienności w przestrzeni podstawowych parametrów złoża (miąższość, zawartość substancji użytecznej, cechy fizyczne itp.), natomiast w sytuacji, gdy złożo wykazuje budowę skomplikowaną obserwuje się znaczne różnice pomiędzy danymi z dokumentacji a danymi ujawnionymi w trakcie eksploatacji złoża. Podkreślano (Margolin—ZSRR, Nemeč—CSRS, Wasiliew—Bułgaria) konieczność opracowania metod obliczania zasobów bardziej przydatnych dla specjalisty planującego eksploatację złoża. Jest to więc kierunek zbliżenia dokumentacji geologicznej do dokumentacji eksploatacyjnej dzięki stosowaniu mniej lub bardziej sprecyzowanych metod. Proponowano podjęcie prac w następujących kierunkach:

1. Opracowanie związków matematycznych wiążących zasoby złoża z selektywnością eksploatacji w przypadkach, gdy wraz z rudą (minerałem) urabia się skałę płonną (J. Auer — CSRS, A. M. Margolin — ZSRR) oraz uzależnianie obliczeń zasobów złoża od technologicznych możliwości odzysku składnika użytecznego z rudy (urobku). Proponowane metody zakładają tworzenie, na podstawie rozpoznania złoża za pomocą tylko wierceń lub łącznie wierceń i wyrobisk górniczych, warlogramów zmian zawartości składnika użytecznego w przestrzeni, bądź też obliczanie map rozkładu tego wskaźnika, stanowiących podstawę do przewidywania kolejnych (w miarę postępu eksploatacji) zmian w jakości urobku. Bardziej zaawansowane prace badawcze zakładają stworzenie pewnego rodzaju modelu złoża (jednak, jak dotychczas, tylko dla złoża o prostej budowie), który to model jest, w miarę uzyskiwania nowych danych, korygowany w całości, co pozwala na polepszanie zbieżności przewidywanych ocen z danymi eksploatacji.

2. Podjęcie nowej metody oceny zasobów złoża (J. Nemeč — CSRS) opartej o konstrukcje blokowe, ale na odmiennej niż dotychczasowe zasadzie. Idea metody polega na tym, że wzdłuż odwiertów liczy się średnie ruchome dla wszystkich mających konkretne znaczenie parametrów złoża, następnie — wykorzystując programy obliczeń aproksymacyjnych na e.m.c. — wyznacza się w przekrojach między odwiertami izolinie dla tych parametrów, które przy uwzględnieniu charakteru i położenia przewiercanych skał zapewniają jednocześnie możliwość ustalenia podziału na „bloki” eksploatacyjne oraz — przy analizie pomiędzy odwiertami — weryfikują lub są weryfikowane

przez elementy tektoniczne. Część parametrów charakteryzujących złoża autor proponował wyliczać, stosując korelacyjne metody oceny ich wielkości na podstawie innych określanych parametrów. Na podstawie izolinii wielkości takich parametrów, jak miąższość, zawartość składnika użytecznego oraz przy uwzględnieniu zastosowanej technologii eksploatacji złoża proponuje się złożę dzielić na mikrobloki, czyli na przestrzenne elementy o tak jednorodnej budowie, że możliwe jest przewidywanie jakości (gdy mikroblok zawiera tylko np. rude) oraz ilości uzyskiwanego urobku. Łącząc w dowolnych wariantach mikrobloki można uzyskać większe jednostki dające możność planowania zarówno eksploatacji, jak i obliczenia zasobów. Przykładowo, dla złóż wapieni i dolomitów ustalono, że przeciętny mikroblok ma wymiary  $10 \times 20 \times 20$  m. Tworzenie modelu tego typu ma tę zaletę, że aczkolwiek początkowo, tzn. w oparciu o siatkę wierceń, np. w kat. C<sub>2</sub>, dane o złożu zawierają duży procent błędów, jednakże ze względu na stosowanie średnich ruchomych oraz aproksymację w przestrzeni w pobliżu wiercenia, strefa ta jest oceniana realnie, przede wszystkim zaś zostaje uwzględniony w dużo większym niż przy stosowaniu średnich lub interpolacji liniowej charakter złoża. W miarę rozwierniania złoża postęp w jego rozpoznaniu jest więc zdecydowanie szybszy aniżeli przy stosowaniu metod klasycznych.

3. Opracowanie kryteriów przyjęcia metod oceny średniej zawartości składnika użytecznego w złożu w przypadku, gdy charakteryzuje się ono dużą zmiennością budowy geologicznej oraz znacznymi zmianami w przestrzennym rozkładzie parametrów (W. I. Kuźmin — ZSRR) proponuje się stosowanie bądź to średnich ważonych, bądź też średnich arytmetycznych z wielkości ocenianych parametrów w bloku uznanym za „w miarę” jednorodny. Propozycja ta dotyczy złóż zmiennych w tym stopniu, że zakłada się, iż zmienność ma charakter losowy, a nie podlega żadnemu trendowi. Gdyby istniał trend — stosuje się metody aproksymacji przestrzennej dla oceny wielkości parametrów. Przedstawiono dane dające możność ustalenia, że dla złóż charakteryzujących się jednocześnie wielką zmiennością miąższości i zawartości składnika użytecznego należy stosować średnią arytmetyczną nie ważoną, gdyż współczynnik korelacji zawartości pierwiastka i miąższości jest bliski zeru. Stosowanie ważonej średniej arytmetycznej (waga jest miąższość) zawartości składnika użytecznego jest wskazane, gdy współczynnik korelacji miąższości i zawartości składnika jest statystycznie znaczący oraz dodatkowo, gdy siatka rozwiernienia jest o dostatecznej gęstości.

#### EKSPLOATACJA ZŁOŻA

W zakresie eksploatacji złóż pierwiastków rozpuszczalnych w dobranym roztworze chemicznym metodą wypłukiwania I. Novak i P. Marček przedstawili oryginalne zastosowanie modelu matematycznego dla opisanego całości procesu wypłukiwania składnika ze skały płonnej, wraz z oceną w poszczególnych otworach eksploatacyjnych ilości uzyskanego składnika. Rozpatruje się, stabilny w czasie, proces przepływu roztworu chemicznego przez porowatą skałę, zawierającą składnik użyteczny. Roztwór chemiczny posiadający tę własność, że rozpuszcza tylko składnik użyteczny jest tłoczony pod ciśnieniem w odwierty, a po przejściu przez ośrodek jest odbierany w siatce otworów eksploatacyjnych. Fundamentalnym zagadnieniem jest możliwość oceny dwu parametrów zmiennych w czasie. Są to: koncentracja składnika użytecznego w górotworze oraz koncentracja składnika użytecznego w roztworze odbieranym w odwiertach eksploatacyjnych. Autorzy założyli, że do oceny obu tych parametrów wystarczające będzie założenie stabilizacji procesu przepływu roztworu przez skałę po upływie pewnego czasu. Podstawowe równanie, opisujące cały proces, ma postać:

$$\gamma \frac{\partial q}{\partial t} + m \frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad } c = 0$$

gdzie:  $q$  — koncentracja składnika w skałe,  
 $\gamma$  — ciężar objętościowy ośrodka skalnego,  
 $m$  — porowatość efektywna ośrodka skalnego,  
 $c$  — koncentracja składnika w roztworze,  
 $t$  — czas,  
 $\vec{V}$  — wektor szybkości przepływu roztworu.

Przyjmuje się ponadto, że na podstawie badań empirycznych ustaleni się jako funkcję  $f(c, q, p)$ , gdzie  $p$  — jest parametrem, od którego zależy szybkość reakcji rozpuszczania. Np. dla sorpcji i desorpcji  $f = a(c - \beta q)$ , gdzie  $a$  i  $\beta$  są współczynnikami, które określa się drogą rozwiązań liniowych równań regresji. Ogólnie równania opisujące proces rozwiązuje się metodami przybliżonymi względem zmiennych  $q$  i  $c$ . Autorzy zamieścili praktyczne przykłady zastosowania metody, dowodząc jej dużej przydatności pod warunkiem realnego określenia postaci funkcji  $f$ .

#### OPRÓBOWANIE ZŁOŻA

Opróbowanie złóż rozpatrywano w referatach L. I. Czetwierikowa — ZSRR i P. A. Wasiliewa — Bułgaria. Poruszano w referatach problemy dotyczące gęstości siatki zdjęcia metalometrycznego (P. A. Wasiliew) oraz ogólnych zagadnień teorii opróbowania (L. I. Czetwierikow). Co do rodzaju i gęstości siatek opróbowywania stwierdzono, że siatka taka zależy od typu złoża oraz od jego budowy. Proponowano dwie drogi postępowania dla osiągnięcia optymalnego rozpoznania złoża.

Droga pierwsza (P. A. Wasiliew) zakłada, że złożo zostanie rozpoznane regularną siatką o dużych odstępach pomiędzy próbkami, następnie wybrany będzie rejon reprezentatywny dla całego złoża, który zostanie rozpoznany za pomocą bardzo gęstej siatki próbek. Ponieważ zakłada się, że rozkład przestrzenny poszukiwanego składnika zawiera składową losową oraz składową odzwierciedlającą genezę złoża należy oddzielić składową losową, wykonując wyrównanie metodą Kallistowa (1966), czyli obliczyć pewnego rodzaju trend w rozkładzie przestrzennym pierwiastka. Tak spreparowane próby są podstawą do obliczenia wzorcowej mapy zawartości pierwiastka na wybranym, reprezentatywnym obszarze. Po obliczeniu mapy wzorcowej nakłada się na nią szereg modelowych siatek o różnym kształcie i zagęszczeniu. Dla każdej takiej siatki odczytuje się wielkości zawartości pierwiastka i liczy mapę. Gdy dobierze się taką siatkę, dla której policzona mapa ma kształt izolinii podobny do mapy wzorcowej, siatkę tę można stosować przy opróbowaniu całego złoża.

Droga druga (L. I. Czetwierikow) zakłada także w pierwszym etapie rozpoznanie złoża za pomocą siatki podstawowej (o dużych odstępach) oraz obliczenie mapy. Następnie na mapie (powierzchni trendowej) wyznacza się stosunki pomiędzy odstępami izolinii w różnych kierunkach (przeważnie wzdłuż prostopadłych osi). Stosunek taki zostaje zachowany przy określaniu odległości pomiędzy próbkami pobieranymi wzdłuż tych kierunków przy dalszym rozpoznaniu złoża.

L. I. Czetwierikow przedstawił także pojęcia z teorii opróbowania, jak: techniczny błąd opróbowania, wiarygodność próby, jej geometrię i reprezentatywność. Pojęcia te opisano, używając pojęć statystyki matematycznej i rachunku prawdopodobieństwa. Autor podał wzory opisujące błędy opróbowania oraz dające możność porównywania próbek o różnej geometrii przez ustalenie stopnia ich reprezentatywności.

#### MODELOWANIE GEOLOGICZNE

Problemy modelowania geologicznego przy użyciu metod matematycznych są obecnie na świecie szeroko dyskutowane. Przedstawione w referatach (R. E. Ad-

ler — NRF, H. G. Borrmann i A. Gottschild — NRD, J. Dienes — WRL, J. D. Dowds — USA) wyniki empirycznego testowania opracowanych modeli poszczególnych cech, procesów i zjawisk, jak również całego środowiska geologicznego (J. D. Dowds), wskazują wyraźnie na celowość stosowania aparatu matematycznego, opartego na elektronicznej technice obliczeniowej.

Jedną z podstawowych technik statystycznych, stosowanych we wszystkich niemal fazach budowy modelu geologicznego, jest korelacja. Sformułowanie problemów korelacji, definicje funkcji korelacyjnych, błędów korelacyjnych pojawiających się przy próbie grupowania punktów modelu geometrycznego, wyrażającego model geologiczny, było przedmiotem wnikliwej dyskusji. J. Dienes (WRL) przedstawił alternatywne propozycje, dotyczące formalnego badania procedur korelacji przez selekcję najmniejszych możliwych do podziału algorytmów lub konstrukcję minimalnej średniej albo minimum maksymalnego korelacyjnego błędu algorytmów.

Pierwszy z przedstawionych algorytmów: EO (excluder-orderer) algorytm wyrażał w tym ujęciu najmniejszą „odległość” (w pojęciu statystycznym) pomiędzy punktami  $x_1, y_1, \tau_1$  i punktami  $x_2, y_2, \tau_2$  oraz najbardziej homogenicznym środowiskiem sedymentacji, drugi IA (integrating algorithm) jest oparty na sformalizowanym założeniu istnienia zależności między „wartością” osadu i sedymentacyjnej części środowiska mierzzonej w skali dynamicznej. Bardzo interesujące i nowe w sformułowaniu było użycie w budowaniu modelu środowiska osadów wodorowęglanowych: statystyk Bayesowskich, procesów Markova oraz funkcji wyrażających statystyczną entropię. Statystyczna entropia, jako miara stopnia nieuporządkowania, została w tym przypadku wyrowadzona z sekwencyjnych procesów Markova, które z kolei były logiczną konsekwencją zastosowanych analiz Bayesowskich.

#### ANALIZY STRUKTURALNE

Kompleksowe rozwiązania, przy użyciu metod matematycznych, dla wydzielenia regionalnych elementów strukturalnych, były przedmiotem dyskusji w oparciu o referaty R. E. Adlera oraz H. G. Borrmanna. Pierwszy z autorów przedstawił, popartą odpowiednimi wynikami badań, wyższość stosowania zmatematyzowanego warsztatu badawczego przy górnictwo-tektonicznym rozpoznaniu wstępnym. Omówił: stosowane metody statystyczne w terenowych badaniach szczelności dla potrzeb prognozowania i bezpośredniego planowania wykonawstwa chodników kopalń i eksploatacji, sposoby komputerowego opracowania wyników pomiarów szczelności z automatycznym określeniem siatek, jako najważniejsza podstawa analizy tektonicznej, metodykę interpretacji wyników, jako podstawę tektonicznych syntez. Przykład Zagłębia Ruhry był przekonującym dowodem na to, że poprzez ograniczenie elementów subiektywnych w opracowaniu istnieje możliwość wyznaczenia nie tylko kierunków głównych naprężeń, lecz także ich zmian w czasie i przestrzeni, jak również możliwość wydzielenia pod względem inwentarza tektonicznego jednostek przestrzennych.

Referat H. G. Borrmanna był w zasadzie przeglądem i analizą stosowanych obecnie metod przy regionalizacji elementów strukturalnych. Przechodząc do rozważań wstępnych, dotyczących opracowania programu na Odrę 1204, ujmującego w sposób kompleksowy podstawowe, w omawianym zakresie rozważań, dane geologiczne, przedstawił i ocenił obecny stan poznania procedur i technik matematycznych, stosowanych we wszystkich etapach opracowania danych geologicznych zarówno w obrębie analizy, jak i kompleksowych wniosków syntetyzujących. Poruszone problemy dotyczyły:

a) prac przygotowawczych, a więc selekcji punktów do aproksymacji za pomocą wielomianów II stopnia zarówno wewnątrz rejonu, jak i na obszarach granicznych, wyboru profilów i liniowych regresji, obliczania różnic głębokości między otworami, obliczania funkcji autokorelacyjnych i spektrów frekwencyjnych oraz analizy założonej siatki;

b) prac analitycznych, a więc: przeprowadzenia, merytorycznego i statystycznie słusznego, wyboru wartości wysokich i niskich, obliczenie współczynników Fouriera, przeprowadzenie „filtracji” wyboru strefowego oraz obliczenie różnic między założonymi siatkami.

Autor wskazał na konieczność opracowania programu kompleksowego, obejmującego całość zagadnienia od wejścia podstawowych danych do ostatecznej syntezy. Omawiając drogę przyszłych badań autor wskazał na konieczność skoncentrowania się nad teoretycznymi rozważaniami, dotyczącymi równań funkcji autokorelacyjnych oraz spektrów frekwencyjnych.

#### SYSTEMY TWORZENIA BANKU DANYCH

Zagadnienie to, stanowiące w zasadzie formalną podstawę stosowania metod matematycznych w geologii w sposób kompleksowy, przedstawiono w kilku referatach i szeroko dyskutowano zarówno w czasie obrad sesji, jak i na zebraniach nieoficjalnych.

O. Stephansson, J. Ekström, H. Berner (Szwecja) przedstawili w swym referacie testowany aktualnie i wprowadzany w powszechne stosowanie program GEOMAP-INTEREST. Jest to program złożony z dwóch programów głównych oraz kilku podprogramów. Program „GEOMAP” operuje zestawczymi kartami pomiarów polowych, które przekazują komputerowi obserwacje geologiczne. Karta (prezentowana na sesji) jest podzielona na odpowiednie segmenty. Stanowi ona typ listy wzorcowej z możliwością jednak zapisania dowolnej liczby tekstu nie pokrytej przez listę wzorcową. Dane informacyjne, dotyczące kodu wiercenia, stanowią osobny segment. Kodowanie może być alfabetyczne, numeryczne lub alfanumeryczne. W segmencie petrograficznym pewne bloki są dublowane w porządku opisującym skalę główną (skala I) i podrzędną (skala II). Kolor jest definiowany przez oznaczenie według wykresu wprowadzonego przez Amerykańskie Towarzystwo Geologiczne — Komitet do Spraw Ujednolicenia Nazewnictwa barw Skał. W bloku mineralnym kod podstawowych minerałów w głównej skali jest zależny od liczebności tych minerałów w skale.

Przebieg wejścia, wyjścia i realizacji (odwzorowania) realizuje w zasadzie program INTEREST (Integrated REtrieval and Statistics). System jest testowany na CDC 3600 komputer i aktualnie przystosowany do IBM s/360—370 i ICT. Wszystkie programy z wyjątkiem kilku przebiegów są napisane w FORTRAN IV. Program INTEREST obejmuje funkcje, które dają możliwość selekcjonowania, grupowania i transformowania danych. Włączone są tu programy statystyczne takie, jak: funkcje wyróżniające (dyskryminujące), analiza czynnikowa, analiza czynników głównych. Wyjście z systemu operuje programami dla drukowania standardowych zbiorów oraz kreślenia map i diagramów. System GEOMAP-INTEREST jest jednym z pierwszych stopni do szwedzkiego ogólnonarodowego banku, opartego o pomiar w klasyfikacji polowej łącznie z włączeniem geofizycznej, geochemicznej i hydrogeologicznej klasyfikacji analogowo-komputerowej.

Referaty uczonych CSRR (I. Hruška, T. Leden, J. Pechlik, A. Valter, V. Shanělec) nosiły dwójakiego rodzaju charakter. Z jednej strony szczegółowo omawiały i prezentowały wyniki pracy własnego, tworzonego narodowego centrum dla dokumentacji i informacji geologicznej „GEOFOND”, z drugiej natomiast przedstawiały międzynarodowe aspekty i systemy sporządzania i projektowania banku danych. J. Hruška,

wchodzący w skład komitetu i grupy roboczej Międzynarodowej Unii Nauk Geologicznych Cogeodata, zajmującej się opracowywaniem standardów i tezaurusów, omówił kolejno i ustosunkował się do obecnie stosowanych lub aktualnie utworzonych systemów i programów dla banku danych, w geologii stosowanej, w poszczególnych krajach.

Najszerzej i najpełniej został omówiony system GIPSY, opracowany w Oklahomie. Wielokrotnie testowany na zbiorach danych geologicznych okazuje się w chwili obecnej optymalnym rozwiązaniem dla informacji geologicznych. Jest to system składający się z szeregu programów opracowanych w języku Fortran. Perspektywiczny wydał się również omawiany system SIGMI, szczególnie w aspekcie semantycznego kodowania. System został opracowany we Francji. Programy pisane w Cobolu dotyczą danych mineralno-petrograficznych i obejmują jedynie w tej chwili system informacji o złożach kopalin. Z wielu innych, omawianych programów na uwagę zasługuje jeszcze system angielski SAFRAS, opracowany w języku Cobol — bliski treściowo i metodycznie systemowi SIGMI.

Omawiając z konieczności w sposób bardzo skrótowy, ten, jak i inne działy prac Sekcji Geologii Matematycznej w Przybramie, należy zaznaczyć, iż

wspomniana grupa robocza Cogeodata, obejmująca 16 specjalistów z wielu rejonów całego świata, pod przewodnictwem dr S. C. Robinsona z Kanady, przygotowuje aktualnie przepisy o charakterze instruktażowym o gromadzeniu zbioru danych, dotyczących złóż.

#### WNIOSKI

1. Na podstawie prac sekcji można sądzić, że główne kierunki zastosowań metod matematycznych w geologii koncentrują się na:
  - a) tworzeniu systemów archiwizacji i przetwarzania danych,
  - b) modelowaniu ośrodków geologicznych, w tym przede wszystkim złóż kopalin.
2. Poszczególne kraje prowadzą własne prace projektowe w dziedzinie tworzenia „banków” danych, co m.in. tłumaczy się tym, że proces unifikacji pojęć i klasyfikacji geologicznych w skali międzynarodowej jest dopiero zapoczątkowany i nie wydaje się, by znalazł on szybkie rozwiązanie.
3. Zwraca uwagę rozwój modelowania przestrzennego w zastosowaniu do złóż i dążenie do zbliżenia dokumentacji geologicznej do dokumentacji eksploatacyjnej.