

Stanisław C. Mularz

BADANIA GEOLOGICZNE, GEOMORFOLOGICZNE, HYDROLOGICZNE ORAZ MODELOWANIE PROCESÓW GEODYNAMICZNYCH*

Począwszy od XVII Kongresu Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (MTFiT), który odbył się w roku 1992 w Waszyngtonie, w ramach Komisji VII (Monitorowanie zasobów i środowiska) działa 10 Grup Roboczych (Working Groups - WG) o następującym zakresie merytorycznym:

- WG1 - „Pomiary fizykalne i wzorce w teledetekcji”
(*Physical Measurements and Signature in Remote Sensing*)
- WG2 - „Monitorowanie zasobów i środowiska z wykorzystaniem danych radarowych”
(*Resource and Environmental Monitoring Using Radar Data*)
- WG3 - „Zasoby odnawialne”
(*Renewable Resources*)
- WG4 - „Zasoby nieodnawialne”
(*Non-Renewable Resources*)
- WG5 - „Monitorowanie ekosystemów naziemnych”
(*Terrestrial Ecosystem Monitoring*)
- WG6 - „Degradacja i pustynnienie obszarów lądowych”
(*Land Degradation and Desertification*)
- WG7 - „Niebezpieczne odpady i zanieczyszczenie środowiska”
(*Hazardous Waste and Environmental Pollution*)
- WG8 - „Monitoring stref wybrzeży, oceanu oraz śniegu i lodu”
(*Snow, Ice, Ocean and Coastal Zone Monitoring*)
- WG9 - „Osadnictwo człowieka”
(*Human Settlement*)
- WG10 - „Monitoring globalny”
(*Global Monitoring*)

Dorobek Komisji VII zaprezentowany na XVIII Kongresie MTFiT w Wiedniu obejmuje 148 referatów o łącznej objętości 846 stron, opublikowanych w tomie B7 „International Archives of Photogrametry and Remote Sensing”.

Niezwykle bogata i różnorodna problematyka Komisji VII dotyczyła następujących głównych obszarów badań:

1. Geologia, geomorfologia, hydrologia i procesy geodynamiczne.
2. Teledetekcja morza, estuaria, interakcja lądu i morza, zjawiska lodowe.
3. Monitoring środowiska, ekosystemy.

* Publikację opracowano na podstawie referatów prezentowanych na XVIII Kongresie ISPRS w ramach Komisji Nr VII „Monitorowanie zasobów i środowiska”

4. Zastosowania teledetekcji w rolnictwie i leśnictwie.
5. Użytkowanie ziemi, klasyfikacja danych wielospektralnych.
6. Metodyka interpretacji danych teledetekcyjnych, pomiary „in situ”, integracja teledetekcji i Systemów Informacji Geograficznej (GIS).

Syntezę powyższych zagadnień przedstawiono w postaci czterech oddzielnych opracowań, których autorami są: Stanisław Mularz, Kazimierz Furmańczyk, Beata Hejmanowska i Katarzyna Dąbrowska-Zielińska.

W syntetycznym ujęciu, problematykę omawianych referatów objętych badaniami „Geologia, geomorfologia, hydrologia i procesy geodynamiczne” można przedstawić następująco:

- Kartografia fotogeologiczna i geomorfologiczna:
 - regionalna;
 - geologiczno-złożowa dla potrzeb poszukiwań złóż kopalin (metale kolorowe i złoża polimetaliczne);
- Interpretacja tektoniki (automatyczna ekstrakcja lineamentów);
- Badania i modelowanie procesów geodynamicznych:
 - zjawiska wulkaniczne;
 - procesy geologiczno-inżynierskie i eoliczne;
 - erozja gleb;
- Integracja teledetekcji i GIS;
- Sensory hiperspektralne oraz pomiary „in situ” dla kalibracji danych teledetekcyjnych.

W aplikacjach teledetekcji dla potrzeb kartowania geologicznego zwracają uwagę nowe propozycje dotyczące przetwarzania i tematycznej interpretacji zdalnych obrazowań. W odniesieniu do regionalnej kartografii fotogeologicznej na uwagę zasługują następujące podejścia:

- deszyfracja jednostek litostratygraficznych w oparciu o metodę klasyfikacji nadzorowanej danych wielospektralnych przy zastosowaniu kryterium największego prawdopodobieństwa (MAXLIKE) i zastosowaniu procedury maskowania. Autorzy wykorzystali kanały 1,4 i 7 oraz stosunek kanałów 3/1, 5/7 i 3/7 systemu LANDSAT TM dla integracji, w środowisku GIS, danych teledetekcyjnych z mapą geologiczną rejonu testowego o pow. 40000 km² (Sudan) oraz wynikami badań geofizycznych [*List F., Ott N., VII str.425*].
- zastosowanie do kartowania geologicznego procedury segmentacji danych wielospektralnych. Proces klasyfikacji przebiega wg trójstopniowego schematu:
 - 1). Poszukiwanie najmniejszych jednorodnych spektralnie obszarów;
 - 2). Redukcja liczby obszarów homogenicznych;
 - 3). Kwalifikacja każdego piksela do określonej klasy spektralnej.

Podstawową korzyścią tego rodzaju podejścia jest możliwość wykorzystania do analizy nieograniczonej ilości kanałów spektralnych, co jest niezwykle istotne przy pozyskiwaniu informacji o powierzchni Ziemi za pomocą sensorów hiperspektralnych [*Baldin R., Haenisch H., VII str. 43*].

- deszyfracja charakteru litologicznego skalnego podłoża na podstawie analizy składowych głównych PCA (Principal Component Analysis) obrazowań systemu LANDSAT TM.

Kompozycje z kombinacją kanałów 7,4,1 jako RGB oraz efektu dzielenia międzykanałowego 5/7, 5/4, 3/1 jako RGB uznano jako materiał o najlepszych walorach interpretacyjnych. Dwa zestawy danych TM (1, 3, 4 i 7) oraz TM (1, 4, 5 i 7) okazały się najbardziej korzystnymi danymi wejściowymi w procedurze PCA, przy czym składowe PC (3) i PC(4) zawierały największy ładunek informacji o składzie mineralogicznym podłoża [Kenea N. H., Haenisch M., VII str. 271].

W kartografii geologiczno-złożowej rysuje się wyraźna tendencja do wykorzystywania danych hiperspektralnych* w powiązaniu z pomiarami radiometrycznymi „in situ”. Interesujące są w tym względzie następujące propozycje:

- wykorzystanie zobrażeń hiperspektralnych pozyskanych za pomocą spektrometru obrazującego AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer) i sposób przetwarzania tych danych dla potrzeb kartowania geologiczno-złożowego, w kontekście poszukiwań metali szlachetnych. Polami testowymi były obszary górnicze Bodie i Paramount w Kalifornii USA, dla których dokonano rejestracji systemem AVIRIS z pułapu 25 km. Po dokonaniu konwersji radiacji na odbicie spektralne (modelowanie MODTRAN) przeobrażonych hydrotermalnie, trzeciorzędowych skał wulkanicznych dane AVIRIS poddano przetworzeniu dwiema metodami:

- 1) Za pomocą klasyfikatora SAM (Spectral Angle Mapping), który jest metodą klasyfikacji nadzorowanej bazującej na określeniu podobieństwa spektralnego danych obrazowych do danych referencyjnych (biblioteka charakterystyk spektralnych plus pomiary „in situ”).
- 2) Z wykorzystaniem algorytmu „USGS TRICODER ALGORITHM”, którego idea sprowadza się do optymalizacji metodą najmniejszych kwadratów danych cyfrowej biblioteki spektralnej (Digital Spectral Library) USGS i wyników rejestracji sensorem hiperspektralnym. Analizę prowadzi się symultanicznie dla wielu minerałów, wielokrotnie diagnozując podobieństwo cech spektralnych każdego piksela z charakterystyką każdego minerału. Zaletą tej metody jest możliwość jednoczesnego analizowania wielu atrybutów niezależnie w paśmie VNIR (Visible Near Infrared 0.4 - 1.3 μm) oraz SWIR (Short Wave Infrared - 2.0 - 2.4 μm).

Wyniki tego rodzaju analizy stanowią podstawę do sporządzenia mapy mineralogicznej, która może być wykorzystywana z powodzeniem dla potrzeb eksploracji geologiczno-złożowej.

- zastosowanie metody CCSM (Cross-Correlogram Spectral Matching) dla prognozy poszukiwawczej złóż miedzi na Cyprze. Idea tej metody sprowadza się do obliczania wartości współczynnika „crosskorelacji” (T_m) pomiędzy spektrum testowym a spektrum obrazowym każdego piksela wg formuły:

$$r_m = \frac{COV_{t,r}}{S_t S_r}$$

gdzie:

* Skanery nowej generacji, których rozdzielczość spektralna wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset kanałów

COV_{tr} - kowariancja pomiędzy nakładającymi się porcjami spektrum testowego (t) i spektrum referencyjnego (r),

S_t, S_r - odchylenie standardowe odpowiednio dla (t) i (r).

Metoda CCSM może być z powodzeniem wykorzystana dla ustalenia wstępnej prognozy poszukiwawczej i zdaniem autora nie wyeliminuje tradycyjnych metod [Van der Meer F., VII str. 726].

- przedstawianie strategii stosowania metod teledetekcyjnych w poszukiwaniach złóż metali kolorowych i kruszców. Interesujące podsumowanie stanu badań i wymagania odnośnie skali, rozdzielczości przestrzennej i spektralnej danych teledetekcyjnych dla detekcji mineralogicznej rejonów złóż polimetalicznych zawiera praca [Spatz D.M., VII str.638]. Problematykę tę ilustruje poniższe zestawienie dla warunków poszukiwań złóż w USA:

Poziom rozpoznania	Cel badań	Powierzchnia eksploracji [km ²]	Skala opracowania	Rozdzielczość przestrzenna [m]
Rekonesans poszukiwawczy	Szybkie rozpoznanie dużych obszarów	5000 - 20000	Mała 1 : 100000	20 -80
Regionalne badanie	Eksploracja w obrębie znanych lub perspektywicznych jednostek geologicznych	500 - 5000	Średnia 1 : 24000	10 - 30
Okręg złożowy (zagłębienie)	Rozpoznanie w obrębie zagłębii górniczych lub masywów hydrotermalnych	10 -500	Duża 1 : 12000	6 - 10
Złoże	Szczegółowe kartowanie geologiczno-złożowe dla projektowania wierceń poszukiwawczych	0,1 - 10	Bardzo duża 1 : 2400	3 -7

W interpretacji elementów tektoniki obserwuje się odchodzenie od analizy wizualno-manualnej zdalnych obrazów na korzyść automatycznej ekstrakcji lineamentów z multispektralnych danych satelitarnych. Na szczególną uwagę zasługuje tutaj praca Wang Jinfei [VII], w której autorka prezentuje swoją oryginalną metodę pod nazwą LINDA (Linear-feature Network Detection and Analysis System). Rozpoznanie i analizę lineamentów prowadzi się etapami, które obejmują: wstępne przetwarzanie (filtracja medianowa) danych obrazowych, wykrywanie krawędzi, kombinację wielokanałową i transformację Hough'a. Wykorzystanie w tej procedurze wielu kanałów, zamiast jak dotąd algorytmów dla pojedynczych kanałów, daje niewątpliwie korzyści w rozpoznawaniu nawet subtelnych oznak tektoniki nieciągłej.

Wykorzystanie analizy lineamentów w oparciu o wielospektralne dane systemu LANDSAT TM dla potrzeb kartografii złożowej (żłotonośne żyły pegmatytowe) przedstawiono w pracy [Cunka, da Fabio S. S. i in., VII str. 172]. W zakresie metodyki interpretacji cech tektonicznych godną odnotowania jest propozycja wykorzystania do tego celu multispektralnych obrazów LANDSAT TM i zdjęć satelitarnych wykonanych wielkoformatową kamerą LFC (Large Format Camera) podczas jednej z misji promu kosmicznego (Spaceshuttle) [Haenisch H. i in., VII str. 262].

W badaniach i modelowaniu procesów geodynamicznych warto zwrócić uwagę na następującą problematykę:

- rejestracja przemieszczeń i odkształceń terenu spowodowanych procesami geodynamicznymi metodą interferometrii radarowej z wykorzystaniem obrazowań optycznych (SPOT PAN). Wykazano, że możliwy jest wówczas pomiar z dokładnością subpikselową, co w niedalekiej przyszłości, gdy rozdzielczość przestrzenna obrazowań optycznych będzie rzędu 1 m, pozwoli na śledzenie zmian powierzchni terenu na dużych obszarach [*Crippen R., Blom R. G., VII str. 159*].
- ocena podatności erozyjnej pokryw glebowych z wykorzystaniem idei modelu USLE (Universal Soil Loss Equation) oraz propozycja klasyfikacji poszczególnych czynników na przykładzie erozji pokryw utworów lessowych w Chinach [*Yu, Jiang, VII str. 816*].
- zastosowanie GIS-u oraz wykorzystanie formuły USLE dla oszacowania zaangażowania erozyjnego pokrowy glebowej na obszarach małych zlewni [*Filho M. V., VII str. 237*].

W zakresie wykorzystania zdalnych obrazowań w studiach geomorfologicznych na wyróżnienie zasługuje praca A. *Linsenbartha* [*VII str. 417*]. Wykorzystanie wysokorozdzielczych stereoskopowych obrazowań MOMS-02 pozwoliło na detekcję i analizę morfologiczną wszystkich rodzajów wydm występujących na Saharze Libijskiej, zaś dane multitemporalne umożliwiły określenie dynamiki, prognozę zmian morfologii i rozwoju obszarów pustynnych.

Nowe jakościowo możliwości pozyskiwania danych teledetekcyjnych stwarzają urządzenia nowej generacji w postaci sensorów hiperspektralnych. W ciągu najbliższych 6-8 lat planowane jest wystrzelenie 36 nowych satelitów do badania zasobów Ziemi, które w większości będą wyposażone w hiperspektralne radiometry obrazujące. W kontekście aplikacji przyrodniczych na szczególną uwagę zasługują następujące urządzenia:

AVIRIS - (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer)

220 kanałów; zakres: 410-2450 nm; rozdzielczość 11 x 11 m z pułapu 20 km (U-2)

HYDICE - (Hyperspectral Digital Imaging Collection Experiment)

210 kanałów (VIS, IR); rozdzielczość: 3 m z pułapu 3 km

MIVIS - (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer)

Produkt firmy Deadalus zaprojektowany specjalnie dla potrzeb poszukiwań złóż kopalin i monitoringu środowiska;

102 kanały rejestrowane przez 4 spektrometry w pasmach:

430 - 830 nm (20 kanałów); szerokość pasma - 20 nm;

1150 - 1550 nm (8 kanałów); szerokość pasma - 50 nm;

2000 - 2500 nm (64 kanały); szerokość pasma - 8 nm;

8200 - 12700 nm (10 kanałów); szerokość pasma - 500 nm;

ASTER - (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) [1998 r.]

Pierwszy sensor multispektralny, który pod względem rozdzielczości spektralnej i przestrzennej jest dostosowany do aplikacji geologicznych;

3 kanały (VIS); rozdzielczość - 15 m;

6 kanałów (SWIR); rozdzielczość - 30 m;

5 kanałów (TIR); rozdzielczość - 90 m.

Wprowadzenie do użytku hiperspektralnych urządzeń obrazujących stwarza szereg problemów, przede wszystkim w zakresie metodyki przetwarzania oraz interpretacji tego rodzaju danych teledetekcyjnych. Praca *J. Taranika* [*VII str. 689*] zawiera podsumowanie dotychczasowych badań w zakresie nauk o Ziemi wraz z prognozą rozwoju teledetekcyjnych

metod i ich aplikacji przyrodniczych, przede wszystkim w odniesieniu do problematyki geologicznej oraz integracji zdalnych zobrazowań z Systemami Informacji Geograficznej (GIS).

Rejestracja w regionie podczerwieni termalnej radiometrem ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) stwarza nowe możliwości w kartowaniu geologiczno-złożowym, badaniach wulkanizmu oraz zjawisk i procesów hydrologicznych. Dla kalibracji hiperspektralnych danych teledetekcyjnych niezbędne będą spektrometry do pomiaru odpowiedzi spektralnej „in situ”. Spośród wielu konstrukcji na uwagę zasługują MIDAC i THIRSPEC produkcji kanadyjskiej [*Kahle A., Morisson A. D., VII str. 327*].

W podsumowaniu należy stwierdzić, iż rozwój metod rejestracji, przetwarzania i interpretacji zobrazowań teledetekcyjnych, w tym zwłaszcza hiperspektralne sensory obrazujące o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, integracja teledetekcji, GIS oraz GPS (Global Positioning System) - wszystko to otwiera zupełnie nowe obszary badań i zastosowań w dziedzinach przyrodniczych. Stanowi też rodzaj wyzwania dla nauki i praktyki, aby zoptymalizować wykorzystanie rysujących się możliwości.

Uwaga

Odsyłacze bibliograficzne z liczbą rzymską odnoszą się do spisu opracowań prezentowanych w czasie Kongresu, który zamieszczony jest na końcu niniejszego zeszytu. Rzymska liczba podana po nazwisku autora określa numer komisji do której należy cytowany tytuł.

Recenzował: prof. dr hab. inż. Zbigniew Sitek