

JÓZEF BAŻYŃSKI

Instytut Geologiczny

## ZASTOSOWANIE ZDJĘĆ SATELITARNYCH W GEOLOGII

UKD 550.814:629.783:528.77

Jest oczywiste, że nasz kraj w dającej się przewidzieć przyszłości nie umieści na orbicie okołozemskiej satelity dla badań własnych. Jest to zbyt kosztowne, a i obszar Polski z góry przesądza opłacalność takiego przedsięwzięcia. Jest jednak wysoce prawdopodobne, że w najbliższej przyszłości przystąpimy do interpretacji i do wykorzystania zdjęć satelitarnych udostępnionych przez organizacje, które takie zdjęcia wykonują. Z tego powodu wydaje się celowe krótkie omówienie zagadnień związanych z możliwościami, korzyściami i trudnościami wykorzystania wyników badań ze sztucznych satelitów, szczególnie w geologii.

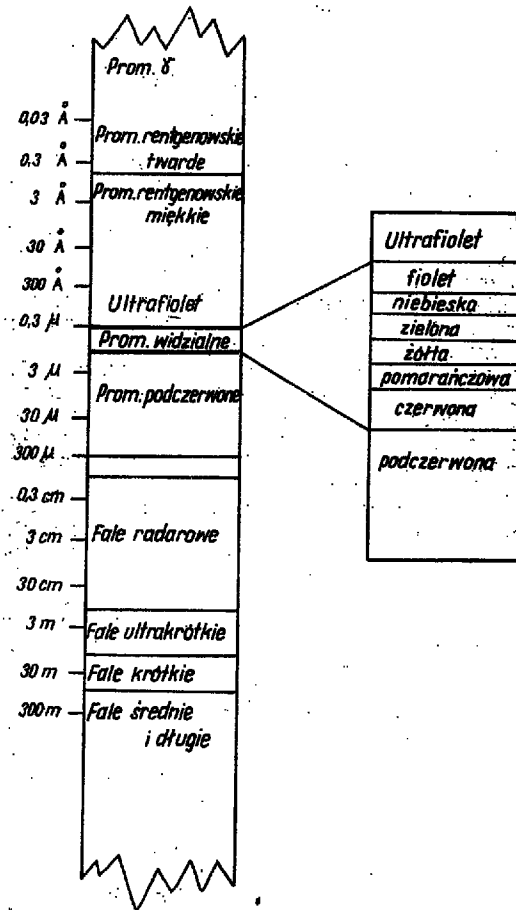
W zakresie wykorzystania zdjęć satelitarnych obserwujemy analogiczną ewolucję poglądów na możliwości interpretacji jak to miało miejsce w przypadku zdjęć lotniczych. Obecnie jednak proces ten przebiega bardzo szybko. Każdy rok przynosi nowe, zaskakujące nieraz osiągnięcia. Dziś celowość i aspekt ekonomiczny wykorzystania zdjęć satelitarnych jest poza wszelką dyskusją. W chwili obecnej najbardziej zaawansowane są badania w dziedzinie meteorologii i oceanologii. Zdjęcia satelitarne radzieckich „Meteorów” i amerykańskich statków kosmicznych typu ESSA przyniosły już poważne korzyści nauce i gospodarce.

Różnorodność metod badań i postęp techniczny w dziedzinie badań Ziemi z obiektów latających zmuszał do wprowadzenia nowego terminu „remote sensing”, co oznacza zdalne (bezdotykowe) rozpoznanie Ziemi. Metody zdalnego, bezkontaktowego badania Ziemi obejmują pomiary i obserwacje promieniowania elektromagnetycznego we wszystkich prawie zakresach fal (ryc. 1) za pomocą kamer, detektorów podczerwieni, odbiorników fal radarowych i radiowych. Dla omawianych celów wykorzystuje się również spektroskopy oraz dokonuje pomiarów pola magnetycznego, elektrycznego i grawitacyjnego.

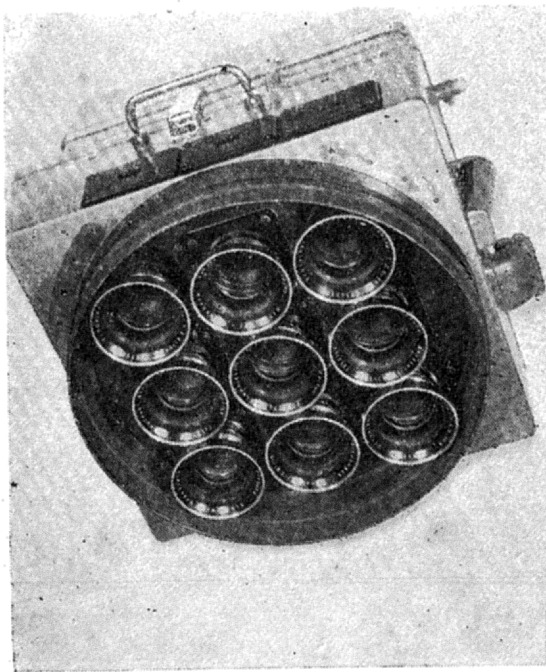
W chwili obecnej, a także w najbliższej przyszłości w badaniach Ziemi z obiektów latających dominować będą obserwacje wykonywane za pomocą kamer w zakresie widma widzialnego, a także podczerwieni. Fotointerpretacja jest więc podstawową techniką w zdalnym badaniu Ziemi, aczkolwiek sama technika wykonywania zdjęć, używany materiał fotograficzny oraz sposoby interpretacji ulegają stałej i szybkiej ewolucji. I tak, obecnie coraz rzadziej stosuje się materiał czarnobiały typu panchromatycznego. Często stosuje się natomiast filmy czarnobiałe, ale uczulone na określone, wąskie pasemka widma, przy czym równocześnie wykonuje się kilka — od 4 do 9 zdjęć dla różnych długości fali przy użyciu specjalnych, srożeńonych kamer wielopasmowych (ryc. 2 i 3). Znaczne udoskonalenia technologii wytwarzania i obniżony koszt zdjęć barwnych spowodowały, że zdjęcia kolorowe wykorzystuje się coraz częściej. W odróżnieniu od materiału kolorowego stosowanego na powierzchni ziemi uczulonego na barwy czerwoną, zieloną i niebieską, filmy stosowane w fotografii satelitarnej uczulone są przede wszystkim na promieniowanie zielone, czerwone względnie podczerwone. Konieczność stosowania materiałów kolorowych w „fałszywych” barwach lub stosowania odpowiednich filtrów uwarunkowana jest ugięciem, rozproszeniem

i częściową absorpcją promieni słonecznych w atmosferze ziemskiej. Zjawiska te powodują względne „wzbogacenie” światła dochodzącego do kamery umieszczonej na sztucznym satelicie Ziemi w promieniowaniu niebieskie i stąd niektóre zdjęcia satelitarne cechuje różny odcień barwy niebieskiej. Przez odpowiedni dobór intensywności uczulenia na określone barwy możemy uwypuklić żądane efekty zdejmowanego obiektu np. litologię lub tektonikę. Interpretując zdjęcia satelitarne musimy uwzględnić fakt, że efekt uzyskany na fotografii zależy od pozycji słońca w momencie wykonywania zdjęcia, kąta padania promieni na obiekt oraz od miąższości rozpraszających warstw powietrza i od odległości kamery od nich.

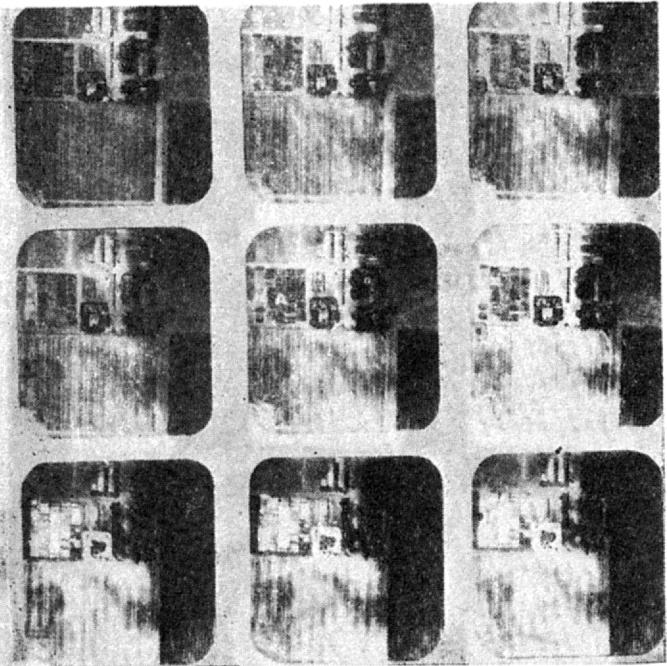
Regionalne syntezę budowy geologicznej dokonywane były dotychczas w oparciu o bardzo pracochłonne zdjęcia terenowe. Zdjęcia satelitarne wykonywa-



Ryc. 1. Zakresy fal elektromagnetycznych wykorzystywane w badaniach geologicznych.



Ryc. 2. Dziewięcioobiektywowa kamera wielopasmowa.



Ryc. 3. Zdjęcia wykonane w różnych zakresach widma (400—900 nm) dziewięcioobiektywową kamerą wielopasmową.

ne z konieczności z wysokości co najmniej 100 km obrazują wycinek Ziemi o powierzchni około 20 000 km<sup>2</sup>, co odpowiada w przybliżeniu powierzchni naszego województwa. Fotografia satelitarna przedstawia więc syntetyczny obraz wszystkich elementów krajobrazotwórczych, w tym i elementów geologicznych. Pracując na zdjęciach satelitarnych przechodzimy od ogółu do szczegółu: odwrotnie niż w toku prac geologicznych prowadzonych z powierzchni ziemi. Do najważniejszych zalet zdjęć satelitarnych należy zaliczyć:

- możliwość objęcia badaniami b. dużych obszarów w bardzo krótkim czasie (z samolotu jest to niemożliwe);
- możliwość objęcia badaniami każdego dowolnego obszaru na Ziemi, w tym również niedostępnego lub trudnodostępnego z powierzchni;
- możliwość powtarzania obserwacji w analogicznych warunkach oświetlenia i śledzenie lub kontrolowanie zmian w środowisku człowieka.

Pierwsze wykorzystanie zdjęć satelitarnych dla interpretacji geologicznej odbywało się na zdjęciach wykonywanych dla celów wojskowych. Obecnie zakres stosowania zdjęć satelitarnych bardzo szybko się rozszerza. Podstawowe dziedziny zastosowania zdjęć lotniczych pokazano w tabeli.

W 1972 r. planowano wystrzelenie satelity ERTS-A specjalnie przeznaczonego do badania naturalnych zasobów Ziemi. Niepowodzenie techniczne spowodowało, że zadanie zostało spełnione tylko częściowo. ERTS-A wyposażony został w 3 sprzężone kamery, które wykonywać miały równoległe zdjęcia w zakresie czerwieni, podczerwieni i zieleni. Parametry tego satelity zostały w ten sposób dobrane, aby przelatywał nad tym samym obszarem o tej samej porze dnia co 17 do 21 dni. W ten sposób uzyskane zdjęcia powtarzalnie miały dostarczyć materiału do analizy zmian w stanie i sposobie rolniczego zagospodarowania, zmian hydrogeologicznych, prądów i procesów akumulacji w strefach przybrzeżnych oraz wpływu katastrofalnych warunków klimatycznych. Za pomocą zdjęć uzyskanych z ERTS-A zamierzono określić aktywność wulkaniczną i dokonać obserwacji zmian w stopniu zanieczyszczenia naturalnego środowiska człowieka.

ERTS-A miał dostarczyć 50 000 zdjęć w pierwszym roku, przede wszystkim z obszaru USA. Powierzchnia zdjęć miała wynosić około 30 000 km<sup>2</sup>, a

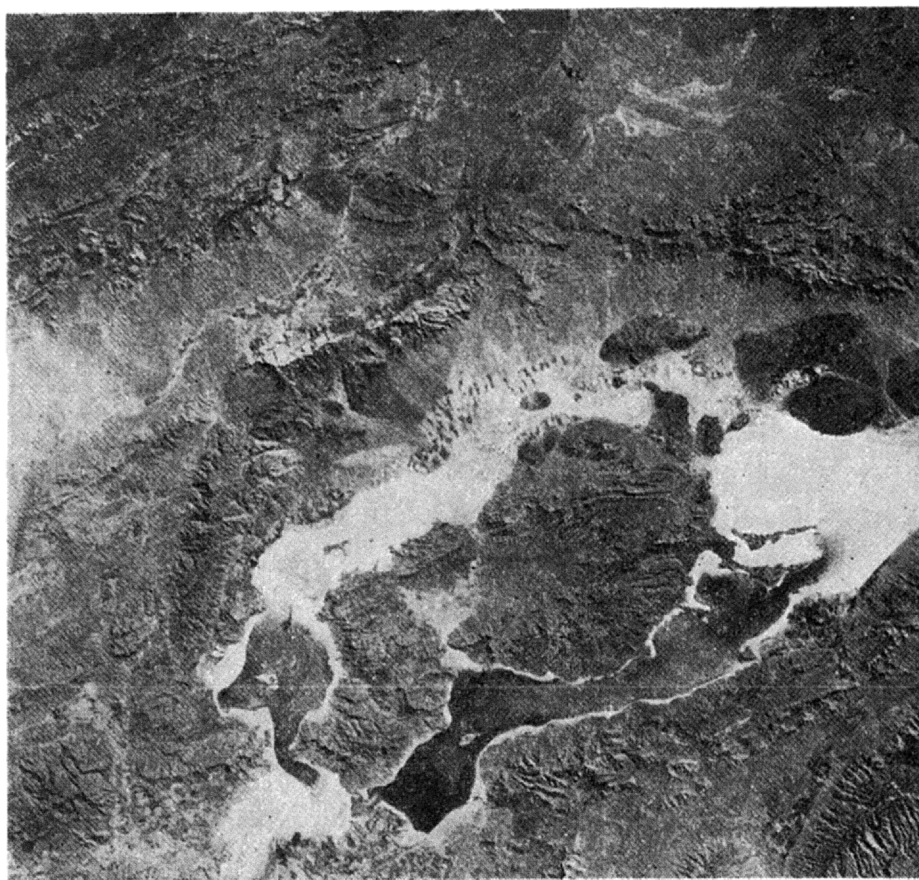
skala 1:1 000 000 lub 1:250 000. W oparciu o zdjęcia z ERTS-A projektowano wykonanie map związanych z zagospodarowaniem przestrzennym, rolnictwem, geologią (w tym geologią inżynierską i hydrogeologią).

ERTS-A wyposażony został również w aparaturę do liniowego wybierania (system Scanner) przeznaczoną do rejestracji i przekazywania danych z odbitych promieni słonecznych, jak również emitowanych przez obiekty w dalekiej podczerwieni. System wybierania liniowego zainstalowany na ERTS-A wykonywał zdjęcia w 4 zakresach widma. Zdjęcia termograficzne uzyskane systemem wybierania liniowego, poza ogólnym zastosowaniem, umożliwiają lokalizowanie źródeł w rzekach, jeziorach i w płytkich strefach mórz, strumieni wód podziemnych, zanieczyszczeń rzek, jezior i mórz, rozpoznanie prądów morskich i dokonanie prognozy oraz kontroli erupcji wulkanicznych.

Obecnie realizowany jest przez USA program „Skylab”. Zakres tego programu dotyczący naturalnych zasobów Ziemi jest w ogólnych zarysach zbliżony do zadań ERTS-A. Zdjęcia wykonane przez jedną załogę „Skylab” w ilości kilkudziesięciu tysięcy przetransportowane będą na Ziemię, gdyż jakość ich jest w tej chwili jeszcze znacznie lepsza od obrazów uzyskanych drogą telewizyjną. Fakt ten spowodował, że dotychczasowa geologiczna interpretacja zdjęć kosmicznych odbywa się przede wszystkim na materiale uzyskanym z lotów statków serii Gemini i Apollo.

Jak już wspomniano interpretację zdjęć satelitarnych wykonuje się przede wszystkim na fotografiach kolorowych. Oko ludzkie lepiej rozróżnia bowiem odcienie barw niż odcienie szare na zdjęciach czarnobiałych. Niestety reprodukcja kolorowych zdjęć jest niemożliwa w ramach niniejszego artykułu. Z tego powodu zainteresowanych odsyłam do literatury. Zresztą każda kolejna reprodukcja powoduje istotne ograniczenie szczegółów niezbędnych do poprawnego odczytywania treści zdjęć. Z konieczności więc załączone przykłady mają charakter tylko orientacyjny. Rycina 4 przedstawia czarnobiałą reprodukcję barwnego zdjęcia wykonanego przez J. Lovella i E. Aldrina podczas lotu Gemini XII w listopadzie 1966 r. nad Zatoką Perską z wysokości około 250 km. Skala zdjęcia wynosi około 1:2 500 000. Widzimy, że na obsza-

Zakres fal	Technika zdjęć	Geologia	Hydrografia i gleboznawstwo	Geografia	Oceanografia	Rolnictwo i leśnictwo	Meteorologia
Fale widzialne (świetlne) białe niebieskie zielone żółte czerwone	Fotografia zwykła (czarnobiała, kolorowa).  Zdjęcia wielopasmowe (wielospektralne) — kamery wieloobiektywowe. Zdjęcia na różnie ukształtowanych filmach, np. białozarne, podczer.-zielone, niebieskie.	Określenie struktur. Kartowanie wielkoprzestrzenne  Określenie struktur. Rozpoznanie różnych skał.	Kartowanie systemu odwodnienia  Wilgotność gleb rodzaje gleb	Wykorzystanie rolnicze. Kartowanie, rozmieszczenie roślinności. Scałowanie gruntów. Kartowanie miast. Planowanie przestrzenne.	Kartografia brzegu i zmiany linii brzegowej, prądy, wiry.  Barwa wody dla stwierdzenia zawartości planktonu	Zdjęcia inwentaryzacyjne. Kartowanie użytków rolnych i leśnych.  Określenie użytkowania i gleb. Stan wegetacji. Opanowanie przez szkodniki. Taksonomia leśna.	Pokrywa chmur. Prognoza pogody.  Pokrywa chmur. Zdjęcia kolorowe przesyłane drogą radiową.
podczerwone — ciepłe prom.	Zdjęcia na filmach w podzerwieni. Termografia Obraz na ekranie	Kartowanie stonków cieplnych (strefy oksydacji w złożach, aktywność wulkaniczna)	Wyznaczenie gleb oziębionych parowaniem	Użytkowanie powierzchni, prądy brzegowe	Kartowanie prądów morskich	Użytkowanie ziemi. Opanowanie przez szkodniki, stan roślinności, pożary leśne	Promieniowanie ciepłe nad lądem i wodą. Prądy morskie.
fale radarowe (0,536 cm—10 m)	Zdjęcia radarowe  Radar specjalny	Zdjęcia mikroreliefu (tektonika i sedimentologia)	Pomiary wilgotności, nachylenia zboczy, erozji gleb.	Użytkowanie powierzchni, mikromorfologia.	Prądy brzegowe.	Rodzaje gleb	Pokrywa chmur. Ostrzeżenia szformowe.
promienie ciepłe (1 mm—30 cm)	Pomiar mikrofal	Rozpoznanie mineralów i warstw zakrytych	Pokrycie śniegu i lodowe — różnice temp. do 1/100°C.	Pomiar grubości lodu na lądzie, kartowanie pokrywy lodowej.	Pomiary grubości lodu na morzu i kartowanie pól lodowych.	Temperatura gleby	
podczerw.-ultrafioletowe.	Spektroskopia absorpc.	Zdjęcia geochemiczne. Poszukiwanie złóż min. Badanie czynnych wulkanów	Chernizm gleb	Rozpoznanie pokryw śnieżnych i lodowych	Kartowanie rozmieszczenia lodu i prądów	Wykrywanie koloni roślinnych na powierzchni.	



Ryc. 4. Przykład dobrze odkrytego obszaru w rejonie gór Zagros na E od Szirazu.

tach dobrze odsłoniętych otrzymujemy prawie gotowe mapy geologiczne. Jest oczywiste, że zdjęcia takie znakomicie ułatwiają określenie perspektywiczności występowania określonych złóż. Przedsiębiorstwa amerykańskie w oparciu o analizę zdjęć satelitarnych wykupiły duże obszary o perspektywach występowania ropy naftowej lub rud metali. Fakt ten spowodował protest naukowców angielskich, którzy oskarżyli USA o zapewnienie sobie nieprawnych korzyści.

Dla celów przyrodniczych, w tym geologicznych, a przede wszystkim hydrogeologicznych oraz rolniczych największe usługi oddają zdjęcia wykonywane w podczerwieni. Chlorofil zawarty w roślinach wpływa bardzo silnie na wysoką zdolność odbijania promieni podczerwonych. Szata roślinna w zależności od stopnia „świeżości”, a więc w zależności również od warunków wodnych powoduje zróżnicowanie czerwonego zabarwienia zdjęć.

Na zdjęciach uczulonych również na promienie podczerwone określić możemy warunki hydrogeologiczne panujące w płytkim podłożu, stan upraw rolniczych, a nawet przewidywać zbiory. Z tego powodu zdjęciom tym zarzucano charakter ekonomicznego szpiegostwa.

Stosowany materiał fotograficzny jest tak drobnoziarnisty, że zezwala na duże powiększenia poszczególnych fragmentów zdjęcia i na bardzo szczegółową interpretację obiektów o wielkości nawet kilku metrów. Obecnie można sporządzić na podstawie zdjęć satelitarnych mapy geologiczne odpowiadające dokładnością skali 1:100 000. Dokładność ta w przyszłości zostanie z pewnością zwiększona.

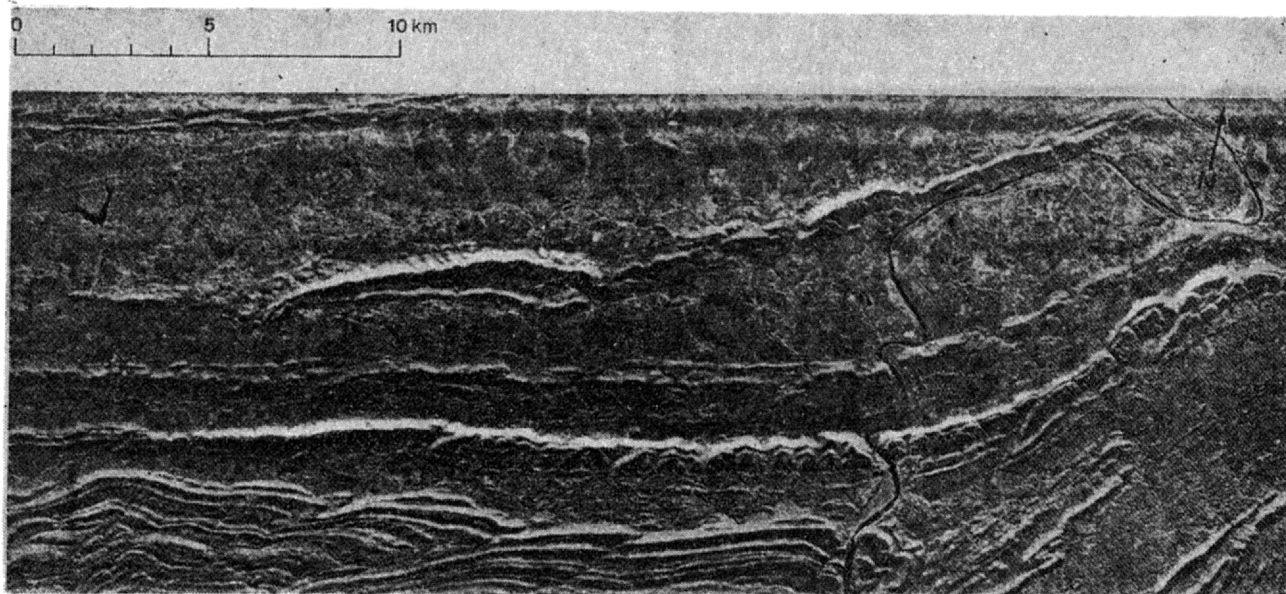
Poza obserwacjami biernymi ze sztucznych satelitów Ziemi czynić można również obserwacje czynne polegające na wysyłaniu fal określonej długości i następnie na rejestracji fal odbitych. W badaniach czynnych stosowane są najczęściej fale radarowe o długości od 0,5 cm do 10 m. Fale radarowe przenika-

ją chmury, mgłę i deszcz oraz częściowo pokrywą roślinną. Te zalety techniki radarowej preferują ją do zastosowania, szczególnie do analizy powierzchni ziemi w strefach tropikalnych, na których większą część roku występuje pokrywa chmur. Tą drogą można określić wilgotność gleby lub gruntu i strukturę skał pod zwierzeliną, skrajnie do głębokości 4–6 m. Zdjęcia w zakresie fal podczerwonych i radarowych stosuje się przede wszystkim dla celów wojskowych. Na przykład zastosowanie badań satelitarnych w podczerwieni umożliwia o 10 min. wcześniejsze zaobserwowanie momentu odpalenia rakiety niż radarowy system obronny.

Przeszkodą w szerszym stosowaniu zdjęć radarowych ze sztucznych satelitów Ziemi jest duże zapotrzebowanie energetyczne urządzeń, które nie może być jeszcze pokryte z obecnie stosowanych źródeł. Zdjęcia radarowe będą stosowane z pokładu stacji kosmicznych typu „Skylab”.

Ciekawą próbę szczegółowej interpretacji wykonano w USA w oparciu o zdjęcia satelitarne stanu Alabama wykonane podczas lotu statku Apollo 9 w marcu 1969 r. Analizę wykonał duży zespół specjalistów znających interpretowany teren. Badania zdjęć satelitarnych wykonane były w oparciu o dość skomplikowane zabiegi fotochemiczne i drukarskie negatywów. Na odpowiednio przygotowane zdjęcia satelitarne naniesione zostały wszystkie dostępne materiały geologiczne i hydrogeologiczne. W wyniku interpretacji wydzielono szereg elementów (szczególnie liniowych), które nie były dotąd znane. Analiza zdjęć wykonywana była na odbitkach kolorowych o barwach naturalnych i skażonych, na odbitkach czarnobiałych z uwzględnieniem podczerwonego zakresu widma. Autorzy opracowania stwierdzają, że zdjęcia satelitarne w zakresie hydrogeologii i geologii inżynierskiej zezwalają na:





Ryc. 5. Zdjęcie radarowe struktur fałdowych, Alabama, USA.

- określenie obszarów przepływu wód gruntowych,
- określenie obszarów, na których występują wielkie zasoby dyspozycyjne wód,
- określenie obszarów do pomiarów niskich przepływów,
- określenie lokalizacji stacji obserwacyjnych,
- określenie najkorzystniejszej pod względem hydrogeologicznym lokalizacji stopni wodnych.

Poza tym zdjęcia satelitarne określono jako pomocne w kartografii geologicznej i w analizie geologicznych elementów strukturalnych.

Jak już wspomniano opłacalność wykonywania zdjęć satelitarnych nie budzi już wątpliwości, chociaż miliardy rubli i dolarów wystrzelone w kosmos chyba jeszcze się nie zwróciły. Jedna z komisji amerykańskiej przewiduje, że w niedalekiej przyszłości stosunek zysków do kosztów przy zastosowaniu zdjęć satelitarnych wynosić będzie jak 20 : 1.

J. Bodechtel (1) podaje dla przykładu, że dla pokrycia zdjęciami lotniczymi całego obszaru USA należałoby wykonać 1,5 miliona zdjęć, które przy obecnych możliwościach należałoby wykonywać 10 lat. Sztuczny satelita Ziemi wykona tę pracę z wysokości 900 km na 400 zdjęciach w 17 dni. Szacunkowy koszt zdjęć lotniczych wynosi 12 milionów, a zdjęć satelitarnych 750 000 dolarów.

Innym poważnym problemem jest bariera zdolności analizowania zdjęć przez człowieka. Satelity już obecnie dostarczają takiej ilości informacji, że nie można ich tradycyjnymi metodami przetworzyć i wykorzystać. Zachodzi więc pilna konieczność, co się aktualnie czyni, całkowitej automatyzacji przetwarzania i opracowywania danych, jeśli główny cel szybkiego praktycznego zastosowania ma być osiągnięty.

Na stronę ekonomiczną wpływa również żywotność satelity. Dla pewnych celów geologicznych korzystna byłaby mała odległość od Ziemi. Żywotność jednak przy orbicie na wysokości 100 km ze względu na tarcie w atmosferze wynosi zaledwie kilka okrążeń. Satelita na wysokości 500 km może krążyć około 5 lat, a na wysokości powyżej 1000 km praktycznie bez ograniczenia. Tak więc w chwili obecnej istnieje luka wysokościowa między samolotem, który może osiągnąć praktycznie pułap 20 km, a sztucznym satelitą Ziemi, który nie może latać niżej niż 100 km.

Na rozwiązanie czeka również wiele problemów prawnych i moralnych. W początkowej fazie lotów kosmicznych NASA udostępniała stosunkowo łatwo zdjęcia satelitarne. Okazało się jednak, że szereg jednostek prywatnych wykorzystywało je dla celów komercyjalnych i spekulacyjnych, a nawet dla celów szpiegostwa gospodarczego, co spowodowało ograniczenie

w udostępnianiu. Możliwość określania udziału powierzchni uprawnych, jakości i stanu użytków oraz możliwości określenia przyszłych zbiorów doprowadziły do spekulacji cenami skupu i sprzedaży.

Szybka analiza zdjęć satelitarnych wykonana przez amerykańskich specjalistów od planowania gospodarczego pod kątem światowej produkcji, wpływu niekorzystnych warunków atmosferycznych i bieżącej kontroli globalnych zasobów surowcowych umożliwiła im na wyprzedzenie decyzji gospodarczych wobec swych kontrahentów.

Wszystkie źródła podają zgodnie, że największe ekonomiczne korzyści osiąga się przez równoczesną wszechstronną analizę zdjęć satelitarnych przez zespół specjalistów. Suma korzyści z poszczególnych interpretacji kierunkowych jest zdecydowanie niższa od korzyści uzyskanej z interpretacji kompleksowej.

Badania orbitalne dla celów meteorologicznych weszły w fazę stałego praktycznego stosowania. W zakresie interpretacji danych dotyczących powierzchni Ziemi badania są jeszcze fragmentaryczne, dotyczą kilku przykładów kompleksowej interpretacji przy braku systematycznych obserwacji. Zasadniczy postęp wiązany z zastosowaniem ERTS-A i laboratorium orbitalnego „Skylab”. Literatura dotycząca zdalnego rozpoznania Ziemi jest już w tej chwili wcale pokazana. B. W. Winogradow i K. J. Kondratiew (6) podają w swej publikacji prawie 300 pozycji. W publikacjach podkreśla się wielokrotnie fakt, że interpretacja jednokierunkowa jest ograniczona, niepełna i często niepewna. Dotychczasowe badania geologiczne obejmowały przede wszystkim obszary, na których skały lite występują na powierzchni. Informacje dotyczące grubej pokrywy osadów klastycznych, przede wszystkim utworów czwartorzędowych, określić należy jako bardzo skromne. Trudno w tej chwili przewidzieć i określić zakres wykorzystania zdjęć orbitalnych dla celów geologicznych na rozległych obszarach czwartorzędu w Polsce. Wydaje się jednak bezsporna celowość powołania zespołu specjalistów dla kompleksowego wykorzystania tego rodzaju zdjęć dla badań nad naturalnymi zasobami naszego kraju w szerokim tego słowa znaczeniu. Być może, że bardziej celowe będzie powołanie narodowych zespołów specjalistów przy RWPG. Nie przesądzając strony organizacyjnej należy stwierdzić, że powołanie takiego zespołu będzie konieczne. Im szybciej tym lepiej. W szeregu państw o zbliżonej do naszej powierzchni zespoły takie już istnieją, a Polska jak wiadomo uplasowała się na czołowym miejscu w świecie pod względem wielkości naturalnych zasobów. Jest więc co chronić i racjonalnie wykorzystywać.

## LITERATURA

1. Bodechtel J., Gierloff-Emden H. G. — Weltraumbilder der Erde. List-Verlag, München, 1969.
2. Kronberg P. — Satellitenaufnahmen und ihre Bedeutung für die geologische Prospektion. Glückauf, 1969, nr 10.
3. Kronberg P. — Erdkundungs-Satelliten und ihre Methoden. Umschau in Wissenschaften und Technik, 1971, H. 9.
4. Powell W. J., Copeland C. W., Drahozal J. A. — Delineation of linear features and application to reservoir engineering using Apollo 9 multispectral photography. Information series 41. University Alabama, 1970.
5. Schneider S. — Moderne Methoden und Geräte der Geländerekundung aus der Luft. Die Erde, 1965, H. 1.
6. Winogradow B. W., Kondratiejew K. J. — Kosmiceskije metody ziemlewiedienija. Leningrad, 1971.