

STANISŁAW MORAWSKI

Uniwersytet Wrocławski

**TELEDETEKCJA RADAROWA
W BADANIACH ŚRODOWISKA
GEOGRAFICZNEGO**

W badaniach teledetekcyjnych obrazy radarowe zyskują sobie coraz większą popularność, szczególnie w przypadku obszarów, na których panujące przez większą część roku niedogodne warunki meteorologiczne nie pozwalają na uzyskanie konwencjonalnych zdjęć lotniczych wykonanych różnymi technikami. Obrazy powierzchni ziemi można otrzymać, wykorzystując radar obrotowy (rotacyjny) lub radar bocznego wybierania. Zdjęcia wykonane radarem obrotowym wykazują bardzo niską rozdzielczość, dlatego spożytkowanie ich przez nauki zajmujące się badaniem powierzchni ziemi jest znikome. Szeroko natomiast stosuje się obrazy bocznego wybierania, znane pod nazwą SLAR (*side — looking airborne radar*). Ich jakość dzięki ciągłemu ulepszaniu aparatury nie odbiega już prawie od jakości małoskalowych zdjęć lotniczych. Jedynym mankamentem są jeszcze wysokie koszty wykonywania obrazów SLAR, 5-krotnie przewyższające nakłady na czarno-białe, panchromatyczne zdjęcia lotnicze.

System radarowy wykorzystuje ogółem 8 pasm mieszczących się w zakresie częstotliwości od 220 MHz do 40 000 MHz. Bliższe dane na ten temat zamieszczone są w tabeli 1.

Wykonując obrazy bocznego wybierania, używa się pasm Q, k i x. Skala zdjęcia nie jest zależna od wysokości lotu samolotu, lecz od optyki i parametrów aparatury użytego systemu radarowego. Najczęściej spotykane skale mieszczą się w granicach od 1 : 100 000 do 1 : 1 000 000. W przypadku prac wymagających specjalnej dokładności wykonuje się obrazy w skali 1 : 50 000. Należy jednak podkreślić, że wraz ze wzrostem skali maleje rozdzielczość zdjęcia, a równocześnie czytelność odwzorowanych na nim elementów.

Tabela 1

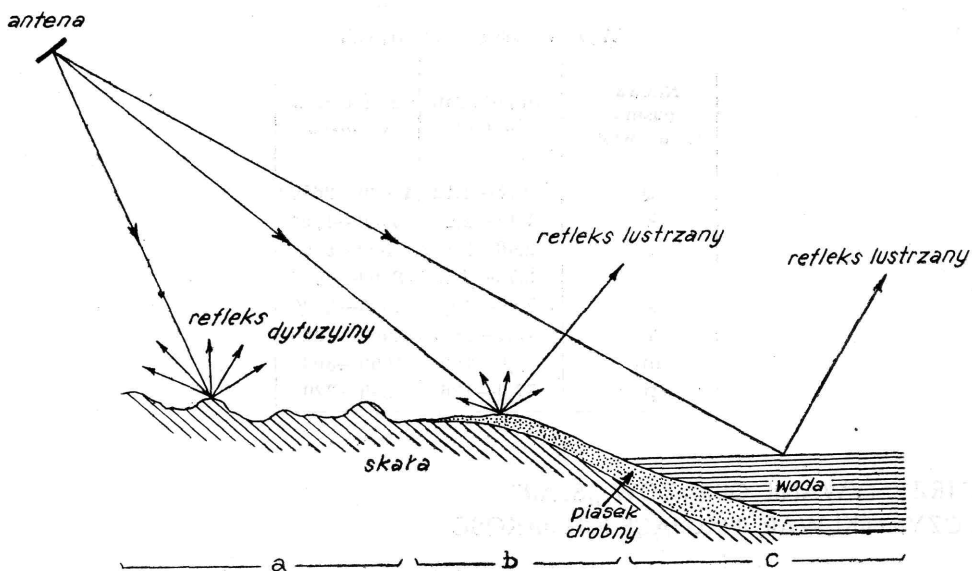
Wykaz pasm radarowych

Nazwa pasma radarowego	Długość fali (w cm)	Częstotliwość (w MHz)
Q	0,75—1,18	40000—26500
k	1,18—2,40	26500—12500
x	2,40—3,75	12500—8000
c	3,75—7,50	8000—4000
s	7,50—15,0	4000—2000
l	15,0—30,0	2000—1000
uhf	30,0—100	1000—300
p	77,0—136	390—220

OTRZYMYWANIE OBRAZÓW „SLAR” I CZYNNIKI WARUNKUJĄCE ICH JAKOŚĆ

Radar jest jednym z aktywnych systemów teledetekcji. W związku z tym na samolotach przeznaczonych do prowadzenia operacji radarowych znajduje się transmitujący generator, będący źródłem wysyłanych impulsów elektromagnetycznych. Fale radarowe emitowane są na zewnątrz za pomocą anteny, prostopadle do linii lotu i w wąskich pasmach. Wysyłanie impulsów odbywa się z przerwami, tzn.: wysłanie — odbiór — wysłanie — odbiór itd. Impuls następny nie będzie emitowany, jeżeli poprzedni nie zostanie odebrany. Emitowane fale docierają do powierzchni ziemi i odbijają się od niej. Od rodzaju odbicia zależy natężenie refleksu powracającego do anteny (rys. 1).

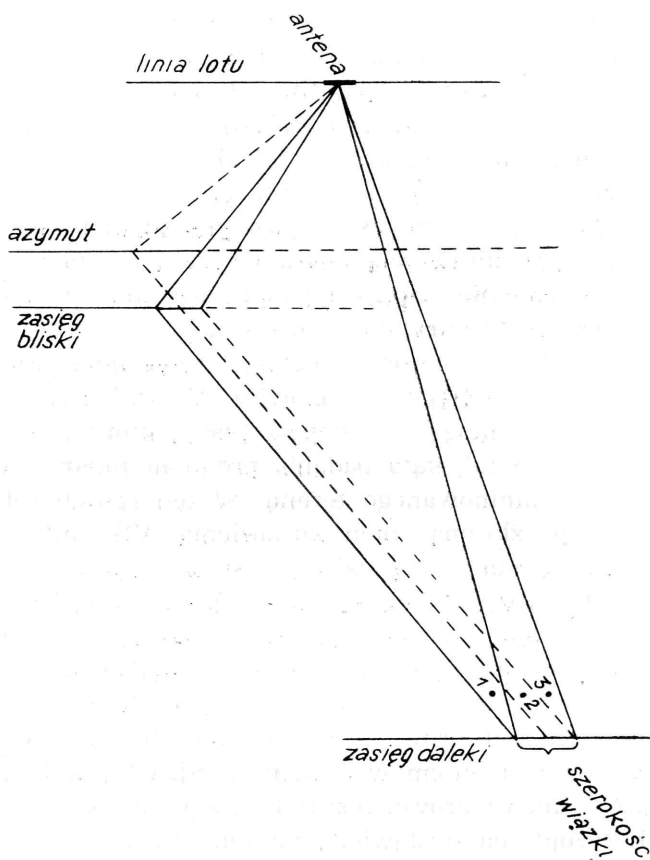
Powierzchnie gładkie odbijają fale pod kątem ich padania na nie, dając tzw. odbicie lustrzane. Tak więc skalne ściany i zbocza usytuowane prostopadle do promieni radaru dadzą refleks bardzo silny. Natomiast z pozostałych powierzchni gładkich refleksy nie dotrą do anteny. Zostaną więc one odwzorowane jako pola ciemne, a w przypadku spokojnych powierzchni wodnych — jako czarne. Energia powracająca jest odbierana przez antenę, a następnie w systemie aparaturowym wzmocniana i przetwarzana na sygnał wizualny w postaci punktu świetlnego. W zależności od ilości odebranej energii natężenie światła poruszającego się punktu będzie ulegać ciągłym zmianom. Ruchomy punkt świetlny rysuje na kliszy fotograficznej obraz w postaci pojedynczej linii. Przesuwanie filmu fotograficznego zsynchronizowane jest z szybkością lotu samolotu. Odwzorowanie poszczególnych obiektów na zdjęciu, wzdłuż linii od zasięgu bliskiego do zasięgu dalekiego, determinuje długość drogi, jaką pokonuje promień od wysłania do powrotu. Tak więc, aby zróżnicować na obrazie dwa zjawiska, fale muszą pokonać dwie różnej długości drogi, co automatycznie wyraża się w dwóch różnych czasach powrotu refleksu. Im krót-



Rys. 1. Wpływ powierzchni na rodzaj refleksu: a — powierzchnia nierówna dająca odbicie dyfuzyjne, b — powierzchnia piaszczysta, płaska, dająca refleks lustrzany z niewielkim rozproszeniem, c — gładka powierzchnia wody dająca odbicie lustrzane.

sze różnice czasowe przebiegu energii na linii antena — punkty terenowe — antena użyty system jest zdolny rozróżnić, tym więcej szczegółów będzie zawierał obraz radarowy. Zdolność tę nazywamy rozdzielczością pasmową. Jej wielkość zależy od długości czasu wysyłania impulsu przez antenę. Im czas wysyłania jest krótszy, tym rozdzielczość pasmowa jest większa. W miarę jednak skracania impulsu wzrasta jego energia, zaś wysyłanie impulsów bardzo krótkich i o wysokiej energii wymaga skomplikowanego ekwipunku.

Poza rozdzielczością pasmową istnieje również azymutalna, uzależniona od szerokości wiązki promieni radarowych. Rys. 2 pokazuje, kiedy w obrazie radarowym zostaną rozróżnione punkty leżące na tym samym kierunku azymutu. Refleksy obiektów 1 i 2 dotrą do anteny w tym samym czasie, gdyż odległość między nimi jest mniejsza niż szerokość wiązki promieni. W związku z tym nie zostaną one odróżnione jeden od drugiego. Natomiast punkt 3 zostanie rozróżniony od dwóch poprzednich. Tak więc punkty na tym samym kierunku azymutu będą odróżnione od siebie tylko w przypadku, gdy odległości między nimi będą większe od szerokości wiązki promieni radarowych. Ponieważ szerokość wiązki jest najmniejsza w obrębie zasięgu bliskiego, również i rozdzielczość azymutalna w tym rejonie obrazu będzie największa. W miarę przesuwania się ku zasięgowi dalekiemu szerokość wiązki promieni wzrasta, a wraz z nią zmniejsza się rozdzielczość azymutalna. Szerokość wiązki wyraża się stosunkiem długości fali do długości anteny. Tak więc aby uzyskać wąską



Rys. 2. Zależność rozdzielczości azymutalnej od szerokości wiązki promieni i od wzajemnych odległości obiektów: odległość 1—2 mniejsza od szerokości wiązki, obiekty 1 i 2 nie zostaną rozróżnione; odległość 1—3 większa od szerokości wiązki, obiekty 1 i 3 zostaną rozróżnione; zasięg bliski — obraz terenu leżącego najbliżej anteny, zasięg daleki — obraz terenu leżącego najdalej od anteny

wiązkę, należy użyć krótszych długości fal i jak najdłuższej anteny. Długość anteny jest jednak limitowana wielkością samolotu, a krótsze fale mają mniejszą siłę przenikania. Należało więc szukać innego rozwiązania zwiększenia rozdzielczości azymutalnej. Efekt taki uzyskano dzięki zastosowaniu tzw. syntetycznych anten i szczelin. Ich działanie polega na filtrowaniu sygnałów i odbieraniu tylko tych, które pochodzą z linii prostopadłych do kierunku lotu samolotu, a więc linii zerowych szybkości względnych, posiadających zerowe przesunięcie Dopplera. Dopuszczając do naświetlania kliszy tylko te sygnały, ogranicza się do minimum wpływ zjawiska Dopplera na jakość obrazu, a przez to uzyskuje się wysoką rozdzielczość azymutalną. W ten sposób dla radaru pracującego na długości fali 8 mm i przy długości wiązki 16 km uzyskano rozdzielczość azymutalną 21 m, a dla fali 3 cm i długości wiązki 30 km około 240 m [5].

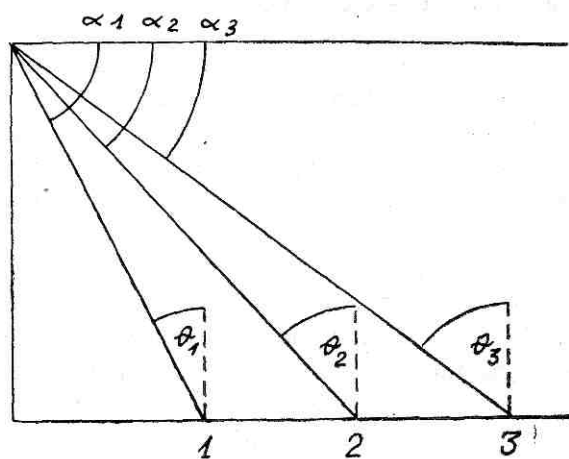
Na natężenie refleksu powracającego do anteny, a przez to i na tonal-

ne zróżnicowanie obrazu wywierają wpływ parametry systemu radarowego i iluminowanych powierzchni [1]. Wielkości związane ze źródłem energii to długość fali (lub jej częstotliwość), polaryzacja i kąt wysyłania promieni. Do czynników terenowych wpływających na obraz zalicza się: stałą dielektryczną, chropowatość powierzchni, kąt padania promieni, rezonanse fizyczne i efekty podpowierzchniowe.

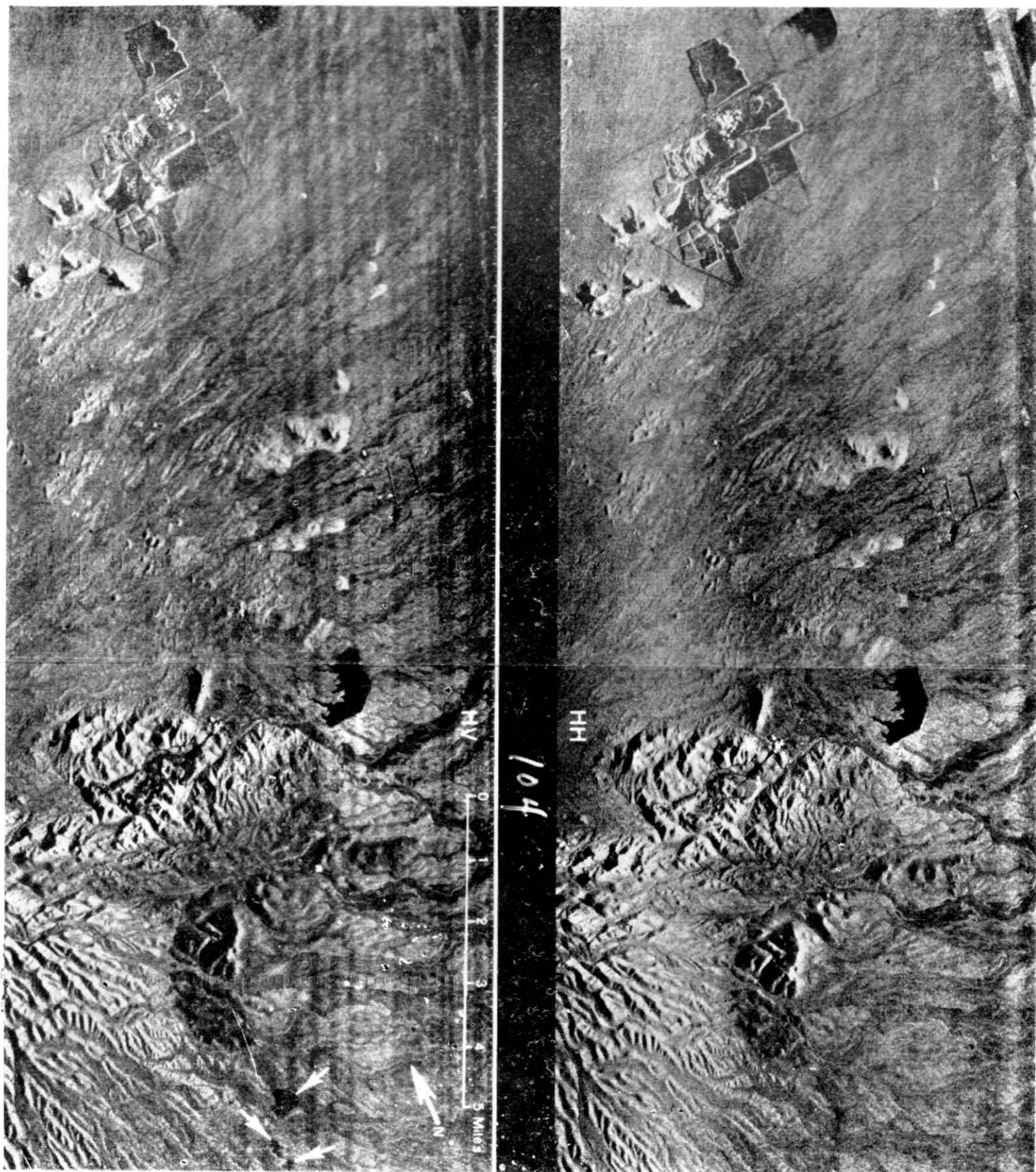
Od długości fal uzależniony jest stopień przenikania energii przez atmosferę. Większą przenikliwością charakteryzują się fale dłuższe. Promienie pasma x w ogóle nie rozpraszają się i mogą zbierać dane o powierzchni ziemi poprzez pył, chmury, deszcz czy śnieg.

W radarze SLAR fale elektromagnetyczne wysyłane przez antenę są spolaryzowane poziomo (HH) lub pionowo (VV). Refleksy w trakcie odbijania od powierzchni mogą ulec depolaryzacji, która jest funkcją częstotliwości wysyłanych fal, kąta padania promieni radarowych oraz budowy i morfologii iluminowanego terenu. W ten sposób refleksy mogą uzyskać polaryzację złożoną: pionowo-poziomą (VH) lub poziomo-pionową (HV). Jeżeli samolot wyposażony jest w dwie anteny o różnych polaryzacjach (HH i VV), to odbiorą one te złożone echa i przedstawią je na obrazie. Porównanie zdjęć polaryzacji jednakowych ze zdjęciami polaryzacji mieszanych może dać dodatkowe informacje uwidocznione niejednokrotnie w zróżnicowaniu tonalnym (fot. 1). Mogą one okazać się niezwykle cenne w czasie prowadzenia terenowych prac sprawdzających.

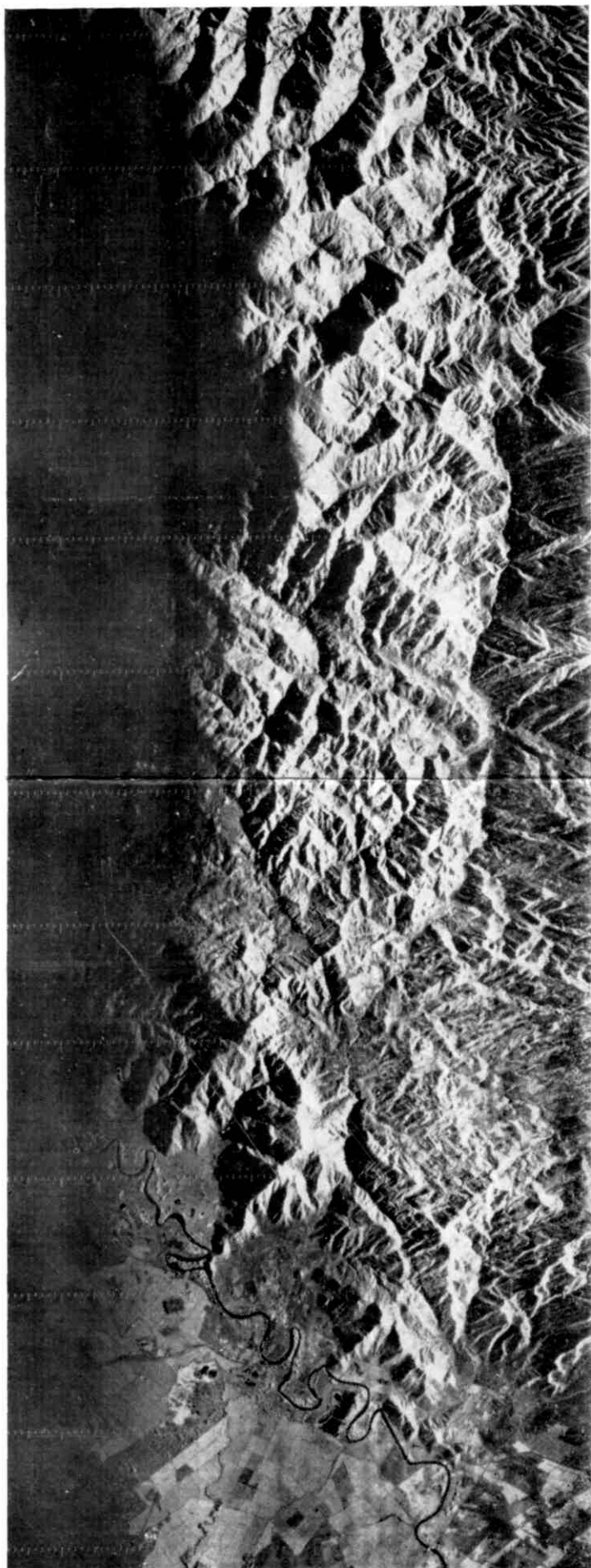
Bardzo ważnym elementem w systemach SLAR jest kąt, pod jakim wysyłane są promienie radarowe. Jest to tzw. kąt depresji (α), zawarty pomiędzy linią horyzontalną wystawioną z anteny a promieniem radarowym (rys. 3). Wszystkie obiekty leżące na linii prostopadłej do linii lotu będą miały inne kąty depresji. Ścisłe uzależniony od niego jest kąt padania promieni na powierzchnię ziemi, będący dopełnieniem kąta depresji



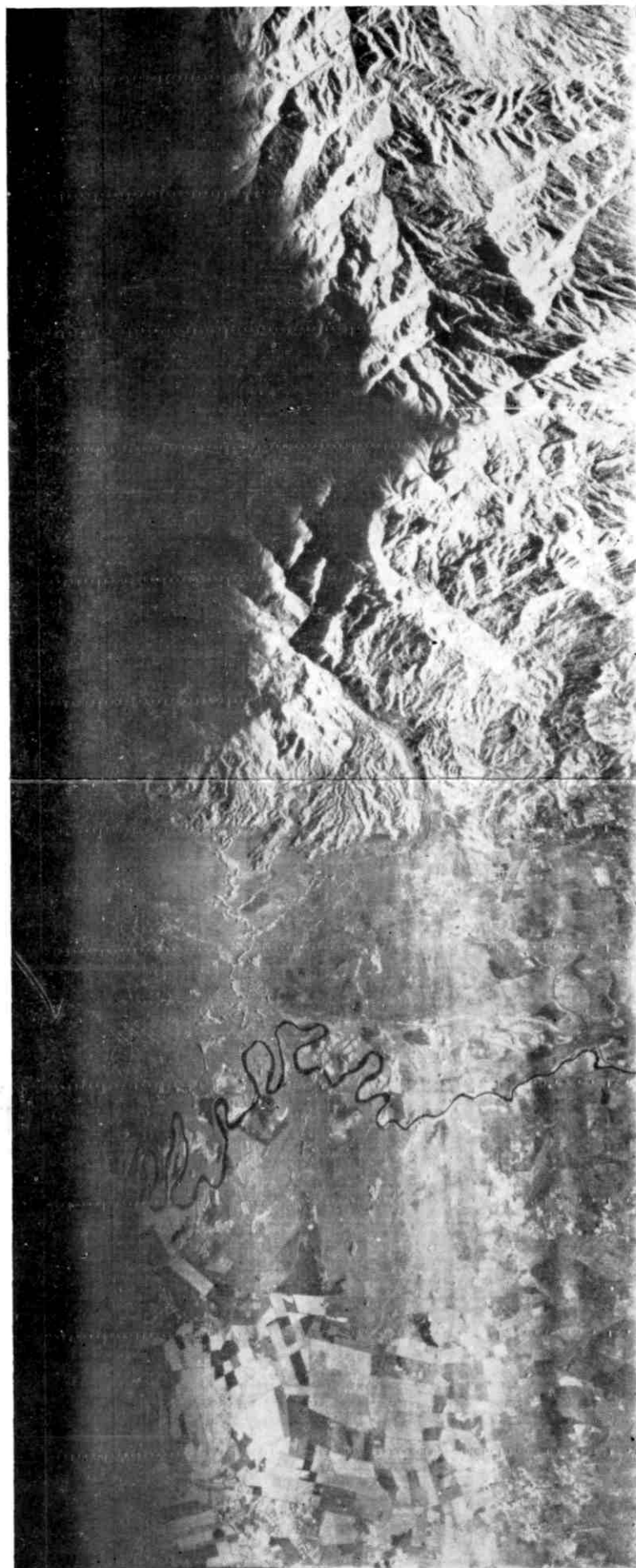
Rys. 3. Zależność kąta padania promieni (θ) od kąta depresji (α) podczas obrazowania powierzchni płaskiej; $\alpha_1 + \theta_1 = \alpha_2 + \theta_2 = \alpha_3 + \theta_3 = 90^\circ$



Fot. 1. Obrazy tej samej powierzchni uzyskane w różnych polaryzacjach fal odbitych: HH — polaryzacja pozioma, HV — polaryzacja poziomo-pionowa; białe, krótkie strzałki na obrazie HV pokazują obiekty wyraźnie różniące się tonem od otoczenia, a które nie uwidaczniają się w obrazie polaryzacji poziomej



Fot. 3. Przykład obrazu radarowego wykonanego w paśmie terenowym; w obrębie zasięgu bliskiego dobrze widoczne największe zniekształcenia wywołane deniwelacją terenu



Fot. 2. Przykład obrazu radarowego wykonanego w paśmie pochylonym; w odwzorowaniu rzeki bardzo dobrze widoczne sukcesywne zmniejszanie skali zdjęcia ku zasięgowi dalekiemu

(rys. 3). Radary SLAR operują najczęściej w przedziale zmian kąta depresji od 20° lub 30° przy zasięgu dalekim, od 75° lub 80° przy zasięgu bliskim, czyli maksymalne amplitudy kąta depresji dla obiektów najbliższych i najdalszych na jednym obrazie wynoszą 55° lub 50° . Są to jakby odpowiedniki kątów rozwarcia obiektywów w systemach optycznych.

Jednym z ważniejszych czynników przyrodniczych wpływających na natężenie refleksu jest stała dielektryczna. Zależy ona od rodzaju materiału powierzchniowego, a głównie od jego wilgotności i porowatości oraz od częstotliwości wysyłanej energii [5]. Obszary wodne charakteryzują się na przykład wysoką stałą dielektryczną. Można stwierdzić, że obiekty wykazujące wysoką stałą dielektryczną oddają silniejsze refleksy, gdyż ich pojemność absorpcyjna fal elektromagnetycznych jest mniejsza.

Chropowatość terenu iluminowanego energią radarową wpływa przede wszystkim na rodzaj refleksu (rys. 1). Powierzchnie płaskie dają odbicie lustrzane, natomiast obszary zróżnicowane, w których budujące je elementy są większe od $1/2$ długości fali, dają refleksy dyfuzyjne. Ponadto chropowatość wpływa na zmianę długości fal odbitych. Powierzchnie gładkie odbijają taką samą długość, jaka została wysłana, albo wydłużają falę; zaś obszary chropowate skracają długość fali. W ten sposób teren różnicuje energię odbitą.

Na wielkość odbijanej energii duży wpływ wywiera kąt padania promieni (Θ). Jest to kąt zawarty pomiędzy promieniem a prostopadłą wystawioną do powierzchni, na którą promień pada (rys. 3). Zmiany nachylenia zboczy przy stałym kącie depresji powodują zmiany kąta padania. Największe refleksy będą docierać do anteny przy najmniejszych kątach padania, tzn. gdy powierzchnia będzie pochylona w stronę radaru.

W szczególnych przypadkach na obrazach radarowych mogą wystąpić rezonanse fizyczne. Wywołują je czasami obiekty znajdujące się w atmosferze. I tak ulewne deszcze mogą spowodować smugowe zaciemnienie obrazu [4].

Na siłę refleksu, a więc i na wygląd obrazu radarowego mają pewien wpływ, chociaż ograniczony, elementy podpowierzchniowe. Należy bowiem pamiętać, że fale używane w systemie SLAR mogą przenikać na niewielkie głębokości w pokrywę roślinną lub nawet w suchą glebę odznaczającą się niską stałą dielektryczną. Efekty podpowierzchniowe może wywołać na przykład występująca na niewielkiej głębokości ostra granica litologiczna lub płytko zalegające zwierciadło wód gruntowych.

ZNIEKSZTAŁCENIA OBRAZÓW RADAROWYCH

Podobnie jak i w konwencjonalnej fotografii lotniczej pewne zniekształcenia obrazu radarowego powodowane są nagłymi przechyłami samolotu lub zmianami wysokości lotu. Inne natomiast związane są z ro-

dzajem samych obrazów. System SLAR wysyła promienie dostarczające następnie informacji o terenie pod zmieniającymi się kątami, ale — należy o tym pamiętać — nigdy pod kątem prostym. Obraz uzyskany w ten sposób posiada pewne analogie do pochylonego zdjęcia lotniczego (fot. 2). Stosując modyfikacje odległości pomiędzy odwzorowaniami poszczególnych elementów powierzchni i wyrównując wielkości tych elementów do rzeczywistych relacji zachodzących w terenie, uzyskać można obraz odpowiadający pionowemu zdjęciu lotniczemu (fot. 3). Tak więc obecnie wykorzystując SLAR, uzyskuje się obrazy pasma pochylonego (*slant range*) oraz obrazy pasma terenowego (*ground range*). Zdjęcia pasma pochylonego charakteryzują się ciągłą zmianą skali w miarę posuwania się od zasięgu bliskiego do dalekiego (fot. 2). Obrazy przedmiotów są nim odwzorowane w odległościach wprost proporcjonalnych do czasu przebiegu odbitych od nich refleksów. Natomiast na zdjęciach pasma terenowego odległości i skala będą wyrównywane.

Poważne zniekształcenia wywołane są deniwelacjami terenu. Refleks z obszaru wyniesionego ponad średnią płaszczyznę odbywa krótszą drogę i stąd jego odwzorowanie będzie przesunięte ku zasięgowi bliskiemu. Odwrotnie ma się sprawa z obniżeniami, które będą przesuwane ku zasięgowi dalekiemu. Tego rodzaju przesunięcia są największe w rejonie zasięgu bliskiego i zmniejszają się ku zasięgowi dalekiemu (fot. 2, 3). Również długość cieni, uzależniona od kąta depresji, wzrasta ku zasięgowi dalekiemu.

INTERPRETACJA I WYKORZYSTANIE ZDJĘĆ RADAROWYCH

Zdjęcia SLAR ze względu na swoją małą skalę dają obrazy większych powierzchni ziemi i w związku z tym mogą być wykorzystane przede wszystkim do rozróżnienia głównych zróżnicowań i struktur regionalnych. Bardziej szczegółową interpretację można prowadzić jedynie nad elementami rzeźby*. Radar dzięki częstemu i intensywnemu cieniowaniu rejestruje rzeźbę i mikrorelief znacznie lepiej niż zdjęcia lotnicze. Odczytując wszelkiego rodzaju obrazy radarowe, należy bezwzględnie pamiętać, że pokazują one głównie wygląd powierzchni, a więc przede wszystkim relief i szatę roślinną. Zarówno rzeźba, jak i wegetacja mogą pośrednio wskazywać na zróżnicowanie w budowie geologicznej i na istnienie określonych form strukturalnych, jak również na występowanie różnorodnych kompleksów geobotanicznych [5, 6]. Niejednokrotnie ważne różnice w typach wegetacji nie są pokazane w zróżnicowaniu tonalnym, a często rów-

* W celu uzyskania prawidłowego obrazu rzeźby terenu obraz radarowy należy oglądać od strony cieni, tzn. w takiej pozycji, żeby zasięg daleki tworzył dolny margines, a zasięg bliski — górny margines obrazu.

niez spotyka się takie sytuacje, że istotne zmiany w szacie roślinnej nie pociągają za sobą zmian tonów obrazu [7].

Ważnym elementem rzutującym na strukturę i budowę podłoża są wzory drenażowe, będące dużą pomocą w interpretacji geologicznej.

Każda specjalistyczna interpretacja obrazów radaru winna wychodzić od wyjaśnienia istniejących różnicowań warunków fizjograficznych i określenia ich wpływu na badane zagadnienie.

Obecnie uzyskanie stereoskopowych obrazów radarowych nie nastęrcza większych trudności. Trójwymiarowy obraz radarowy jest znacznym postępcem w rozwijaniu systemów SLAR, ponieważ można z nich wyliczać zarówno wysokości odwzorowanych przedmiotów, jak i nachylenia zbcoczy [3].

Obrazy radarowe w porównaniu ze zdjęciami lotniczymi dają poważnie zubożone informacje o powierzchni ziemi. Powinno się więc wykrczystywać je tylko w przypadku terenów o szczególnie trudnych warunkach meteorologicznych. Do takich należą obszary wysokich szerokości geograficznych i dżungli równikowych.

LITERATURA

- [1] HOLTER M. R., 1970: *Imaging with nonphotographic sensors. Remote sensing*, Washington.
- [2] KOOPMANS B. N., 1973: *Drainage analysis on radar images*, „ITC Journal” n° 3.
- [3] KOOPMANS B. N., 1974: *Should stereo SLAR imagery be preferred to single strip imagery for thematic mapping*, „ITC Journal”, n° 3.
- [4] LEBERL F., 1974: *Evaluation of SLAR image quality and geometry in PRORADAM*, „ITC Journal”, n° 4.
- [5] MEKEL J. F. M., 1972: *The geological interpretation of radar images*, Enschede.
- [6] RYDSTROM H. O., 1970: *Imaging natural features with high resolution radar*, Goodyear Aerospace, Lichtfield Park, Arizona.
- [7] SICCO SMIT G., 1975: *Will the road to the green hell be paved with SLAR?*, „ITC Journal”, n° 2.

STANISŁAW MORAWSKI

RADAR REMOTE SENSING USED IN GEOGRAPHICAL ENVIRONMENT INVESTIGATIONS

S u m m a r y

SLAR radar pictures are finding an ever wider application in the interpretation of the elements forming the earth's surface. Their appearance (tonal differentiation) and quality depend both on the parameters of the apparatus used and also on the factors characterising the section of the earth's surface studied. Deformations appearing on the radar pictures may be due to change in the flight parameters and also to variations in ground level. For interpretation of the SLAR photographs all the

factors affecting the picture and its deformation must be considered. Moreover, for a final interpretation of the picture the greatest possible number of elements of the natural environment and their interrelations and interreactions should be taken into account. For this reason it is essential in this process to have close cooperation between specialists of many branches of science.

STANISŁAW MORAWSKI

LA TÉLÉDÉTECTION PAR RADAR DANS LES RECHERCHES DU MILIEU GÉOGRAPHIQUE

R é s u m é

Les images de radar de SLAR trouvent l'application de plus en plus fréquente dans l'interprétation des éléments de la surface de la terre. Leur aspect (différenciation tonale) et la qualité dépendent aussi bien des paramètres de l'appareillage d'image employé que des facteurs caractérisants la surface présentée de la terre. Les déformations sur les images de radar peuvent être causées par le changement des paramètres de vol et par le dénivellement du terrain. En déchiffrant les photos de SLAR il faut prendre en considération tous les facteurs agissant sur l'image et sa déformation. En outre, dans l'interprétation finale de l'image il faut prendre en considération le plus grand nombre d'éléments du milieu naturel, dans leurs liaisons et influences réciproques. D'où la nécessité d'une coopération étroite des spécialistes de plusieurs disciplines scientifiques.