

Analizy teledetekcyjne obszarów leśnych w Polsce i ich rozwój

# Zaczęło się od zdjęć w podczerwieni

Pierwsze badania nad zastosowaniem teledetekcji w leśnictwie prowadzone były w Polsce już w latach 70. ubiegłego wieku. Ich pionierem był zmarły niedawno prof. Wojciech Bychawski.

**Emilia Wiśniewska,  
Tomasz Zawila-Niedźwiecki**

**W** Ośrodku Przetwarzania Obrazów Lotniczych i Satelitarnych (OPO-LiS) Instytutu Geodezji i Kartografii pod kierunkiem lub przy wsparciu prof. Wojciecha Bychawskiego zrealizowano wiele projektów dotyczących oceny stanu lasów. Wyniki tych badań, ich popularyzacja, a szczególnie opracowania metodyczne oraz sformułowanie warunków technicznych wykonywania i interpretacji zdjęć lotniczych do oceny stanu lasu położyły podwaliny współczesnej teledetekcji lasu. Profesor był „ojcem” polskiej teledetekcji lasu, pionierem zastosowań barwnych zdjęć lotniczych w podczerwieni, promotorem wykorzystania zdjęć satelitarnych, mistrzem i nauczycielem kolejnych pokoleń. Jego praca naukowa i praktyczne zastosowanie nowatorskich wyników badań zostały docenione licznymi nagrodami, m.in. Kordelasem Leśnika Polskiego, najwyższym wyróżnieniem Lasów Państwowych [wspomnienie o Profesorze opublikowaliśmy w GEODECIE 12/2020 – red.].

## • Barwa na zdjęciu spektrostrefowym

W badaniach tych analizowane były m.in. barwne zdjęcia lotnicze w podczerwieni (zwane też spektrostrefowymi lub CIR – Color InfraRed), z których powstawały mapy przedstawiające przestrzenny rozkład oraz stan lasów. Opracowane

zostały także metody postępowania i wytyczne techniczne stosowania fotointerpretacji w praktyce leśnej. Prace badawcze z tamtych lat – mimo że zdjęcia najczęściej były wykonywane na materiałach analogowych – do dziś mogą służyć jako wskazówki przy interpretacji treści istotnych dla prowadzenia gospodarki leśnej. Do uzyskanych wówczas wyników nadal się wraca i są one rozwijane w kolejnych projektach naukowych i wdrożeniach.

Prof. Wojciech Bychawski w swoim najważniejszym nurcie badań zajął się poszukiwaniem korelacji między wskaźnikiem barwy na zdjęciu w podczerwieni a stanem aparatu asymilacyjnego [Bychawski, Iracka, 1978a], a także statystycznym wpływem różnych części koron drzew oraz różnych pięter lasu na kształtowanie się barwy [Bychawski, Iracka, 1978b]. W ramach informacji o obszarach leśnych, które można uzyskać ze zdjęć spektrostrefowych, wyróżniono dwie kategorie pozwalające opisać:

I – stan powierzchni obszaru leśnego, np. strukturę gatunkową i wiekową, zwarcie pułapu koron, występowanie luk czy zwarłość kompleksu leśnego;

II – jakościowy stan koron drzew przejawiający się zasobnością w liście lub igły oraz ich barwą, a także formą koron.

Aby wymiennie interpretować spektrostrefowe zdjęcia lotnicze lasu, opracowano metodę polegającą na posługiwaniu się liczbowymi wskaźnikami charakteryzującymi jakość bądź pojedynczych drzew, bądź pewnych fragmentów drzewostanu [Bychawski, 1980]. Były one

określane w wyniku obserwacji modelu stereoskopowego.

Cechy wymienione w kategorii I można pozyskać również ze zdjęć wykonywanych w innych technikach (RGB, B/W). Natomiast II kategoria wymaga wykorzystania zdjęć, które pozwalają na ocenę stanu aparatu asymilacyjnego dzięki informacji o odbiciu promieniowania elektromagnetycznego od drzew czy fragmentów drzewostanów w zakresie bliskiej podczerwieni i wybranych zakresów promieniowania widzialnego. Do interpretacji tego typu zdjęć ważne było opracowanie wymiernych wskaźników barwy pozwalających na obiektywną (realizowaną przez różnych obserwatorów) ocenę kondycji drzew. Podczas interpretacji wizualnej stosowanej w takich ocenach możliwe jest wyróżnienie kilku barw (na ogół od 3 do 5) powiązanych z kondycją drzewa.

Jest to o tyle istotne, że w zależności od kanałów tworzących obraz w barwach nierzeczywistych (niektóre zobrazowania mogą rejestrować więcej zakresów niż tylko niebieski, zielony, czerwony i bliska podczerwień) i zastosowanych przetworzeń (korekcy radiometrycznych, zmian kontrastu i jasności, filtracji, wagowań) zdjęcia z różnych nalołów mogą pokazywać obszar lasów w różnej kolorystyce. Na przykład w opracowaniach z lat 80. XX wieku wykonywanych na trójwarstwowych (Kodak Aerochrome IR 2443) i dwuwarstwowych (SN-6) analogowych filmach spektrostrefowych przy interpretacji przeprowadzonej dla drze-

wostanów sosnowych na obszarach przemysłowego zanieczyszczenia powietrza najniżniejsza niebieskozielona barwa koron drzew została przypisana drzewom martwym, a drzewom żywym – w zależności od kondycji – trzy barwy ciepłe od różowo-szarej do ciemnopurpurowej. Następnie określano udział poszczególnych kategorii drzew na reprezentujących drzewostan powierzchniach próbnych.

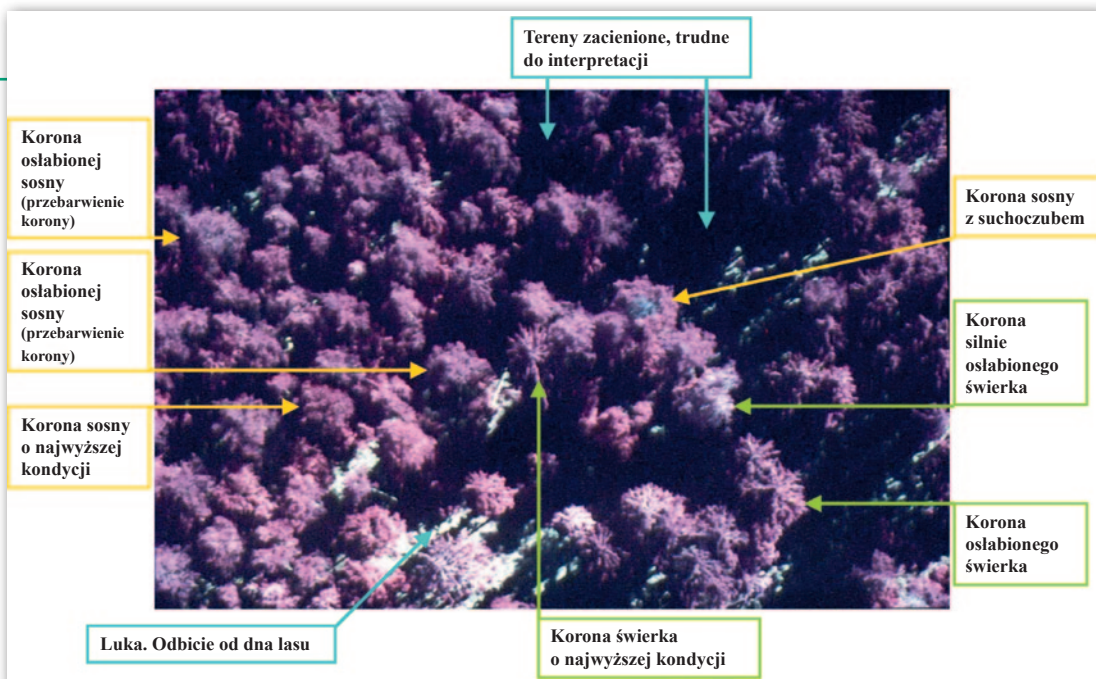
## ● Analizy statystyczne i modele trójwymiarowe

Kolejne prace bazowały na formułach matematycznych opracowanych przez prof. Bychawskiego i dotyczyły wyznaczania stref zagrożenia przemysłowego, oceny stanu zdrowotnego i stanu sanitarnego lasu. Zaletą opracowań wykonywanych i inspirowanych przez Profesora jest ich zorientowanie na praktyczne zastosowania. W efekcie powstawały nie tylko mapy, ale także zestawienia inwentaryzacyjne wykonywane zgodnie z obowiązującymi w Lasach Państwowych standardami. W latach 1984-1985 po raz pierwszy na dużą skalę dokonano oceny stanu lasu na podstawie zdjęć lotniczych. Badaniami objęto blisko 70 tys. ha w kilku nadleśnictwach (Świeradów, Szklarska Poręba i Śnieżka) oraz w Karkonoskim Parku Narodowym.

Te pierwsze innowacyjne opracowania z zakresu teledetekcji leśnej ukierunkowane były zarówno na interpretację treści zdjęć (tj. określanie wybranych elementów taksacyjnych i stanu zdrowotnego drzew oraz drzewostanów), jak i pozyskanie informacji o geometrii obiektów leśnych poprzez prowadzenie obserwacji na modelach trójwymiarowych. Stereoskopowa obserwacja i interpretacja umożliwiały uzyskanie bardziej szczegółowych i dokładnych informacji niż przy analizach płaskiego obrazu ortofotomapy.

Pierwsze analizy spektrostrefowych zdjęć lotniczych obszarów leśnych prowadzono w celu określenia stref zagrożenia drzewostanów sosnowych pod wpływem działania zakładów przemysłowych [Bychawski i in., 1977]. Dla lasów w Bełchatowskim Okręgu Przemysłowym do różnicowania jakości drzewostanów wykorzystano zależność między barwą korony na zdjęciu a ubytkiem aparatu asymilacyjnego. Stworzona metoda [Bychawski, Iracka, 1978a] by-

Źródło: Wiśniewska 2013



1. Barwne zdjęcie lotnicze w podczerwieni (spektrostrefowe) z widocznymi koronami świerków i sosen o różnej kondycji. Interpretacja wizualna wybranych elementów lasu na pojedynczym zdjęciu

ła stosowana z powodzeniem przez wiele lat, co pozwoliło obserwować tempo zmian i przewidywać rozwój występujących na badanym obszarze zjawisk. Powstały również opracowania dotyczące lasów dotkniętych gradacjami owadów [Bychawski i in., 1988].

## ● Od Sudetów do całej Europy

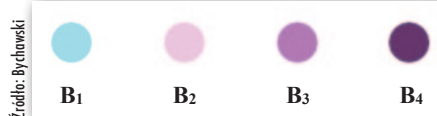
Przez wiele lat Profesor kierował kompleksowymi badaniami degradacji środowiska w Sudetach Zachodnich. Mapy szaty leśnej opracowywano najpierw z wykorzystaniem zdjęć lotniczych, a następnie satelitarnych. Przykładem interpretacji wizualnej spektrostrefowych zdjęć lotniczych jest mapa zdrowotnego i sanitarnego stanu lasów dotkniętych klęską ekologiczną w Sudetach Zachodnich (1984 r.). W wyniku stereoskopowej analizy zdjęć lotniczych (wykonanych na filmie dwuwarstwowym) wyodrębniono zasięgi drzewostanów iglastych pod względem stanu sanitarnego, wydzielając drzewostany:

- martwe,
- świerkowe obumierające,
- świerkowe silnie osłabione,
- świerkowe osłabione.

Wyróżniono także inne klasy charakteryzujące badane obszary leśne:

- zasięgi drzewostanów o rozluźnionym zwarciu,
- wywroty i złomy,
- wylesienia,
- zalesienia i odnowienia,
- drzewostany liściaste i mieszane,
- kosodrzewinę.

Wykonana na podstawie takiej inwentaryzacji mapa pozwala na analizę związków między występowaniem niekorzystnych zjawisk i ich nasileniem a zmieniającą się morfologią terenu czy



Źródło: Bychawski

2. Przykładowa skala barw obrazów koron drzew widocznych na zdjęciu spektrostrefowym: B1 – barwa korony drzewa martwego, B2 – barwa korony drzewa silnie osłabionego, B3 – barwa korony drzewa osłabionego, B4 – barwa korony drzewa o najwyższej kondycji

wysokością nad poziomem morza. Ponadto (a z punktu widzenia praktyki leśnej – przede wszystkim) opracowanie obejmowało szczegółowe wskaźniki zdrowotnego i sanitarnego stanu lasu obliczone na podstawie zdjęć dla każdego wydzielenia taksacyjnego. Materiały te stanowiły również podstawę do interpretacji zdjęć satelitarnych, które w połowie lat 80. XX wieku zaczęto wprowadzać do wielkoobszarowego monitorowania lasów Europy.

## ● Kamienie milowe

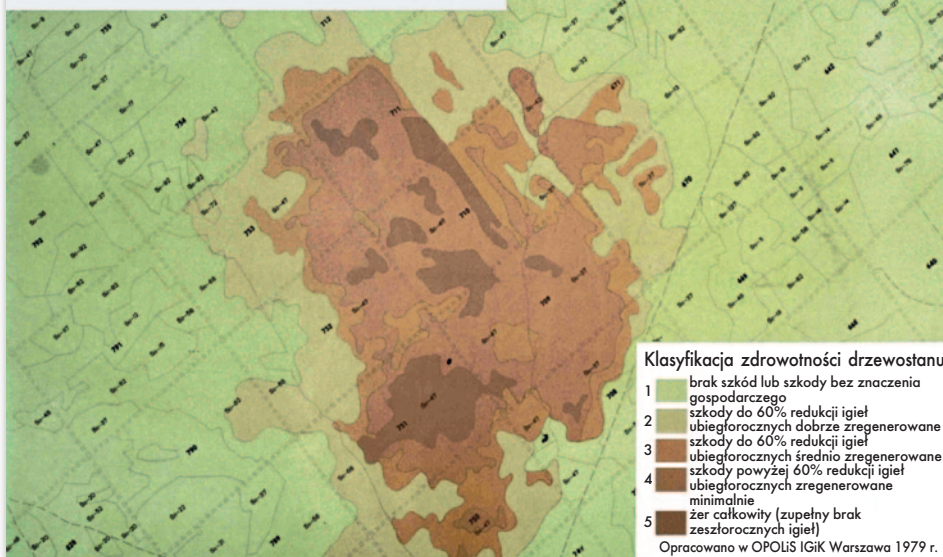
Spśród projektów przez prawie 30 lat prowadzonych pod kierunkiem prof. Bychawskiego lub przy jego wsparciu warto wymienić opracowania będące kamieniami milowymi rozwoju teledetekcji lasu:

- ocena zniszczeń spowodowanych gradacją poprocha cetyniaka w borach sosnowych Puszczy Augustowskiej w 1975 r. (interpretacja zdjęć pozwoliła wyróżnić na mapie stworzonej na podstawie leśnej mapy drzewostanowej pięć stopni uszkodzeń);

- ocena zniszczeń spowodowanych gradacją brudnicy mniszki w Borach Tucholskich (interpretacja zdjęć w latach 1980, 1981, 1982 dla lasów Nadleśnictwa Osie pozwoliła opracować mapy uszkodzeń i zbudować model zmienności



STREFY USZKODZEŃ DRZEWOSTANÓW SOSNOWYCH W PUSZCZY AUGUSTOWSKIEJ SPOWODOWANYCH ŻEREM SZKODNIKA OWADZIEGO POPROCHA CETYNIAKA (*Bupalus piniarius* L.)  
Wyznaczono na podstawie interpretacji lotniczych zdjęć spektrostrefowych  
Skala 1:8500



3. Barwne zdjęcie lotnicze w podczerwieni (spektrostrefowe) z widocznym uszkodzeniem drzewostanów sosnowych spowodowanych żerem szkodnika owadziego poprocha cetyniaka w Puszczy Augustowskiej i mapa fotointerpretacyjna z 5 stopniami uszkodzeń drzewostanów

ubytku aparatu asymilacyjnego przedstawiający dynamikę zmian wraz z prognozą na lata następne);

- określanie na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych stref zagrożenia drzewostanów będących pod wpływem szkodliwego działania zakładów przemysłowych: mapa z 1979 roku ze strefami uszkodzeń drzewostanów sosnowych pozostających pod wpływem emisji Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, mapa z 1979 roku ze strefami zagrożenia drzewostanów sosnowych Leśnictwa Tokary w Nadleśnictwie Konin, zmiany stanu lasów w Bełchatowskim Okręgu Przemysłowym (analiza zmian i mapy stanu sanitarnego z 1981 i 1985 r.);

- analiza zmian i badania degradacji środowiska w polskiej części Sudetów (analizowano zdjęcia lotnicze z lat 1975, 1982 i 1984, a także zdjęcia satelitarne Landsat MSS, TM i ETM+, Kosmos oraz SPOT);

- analiza stanu zdrowotnego lasów w Pienińskim Parku Narodowym (na podstawie interpretacji zdjęć lotniczych opracowano mapę stanu zdrowotnego lasu; nowatorska metoda uwzględniała nie tylko potrzeby ochrony przyrody w parku narodowym, ale także integrację danych podkładowych i georeferencję z przejściem z katastru galicyjskiego na współczesne warunki techniczne sporządzania map topograficznych, lata 1988-1991);

- ocena stanu lasów na zdjęciach satelitarnych z wykorzystaniem systemów informacji przestrzennej (analizy pogorzelska koło Kuźni Raciborskiej, analiza lasów Puszczy Kozienickiej i Puszczy Knyszyńskiej, lata 1994-2004).

Kierując się wcześniej uzyskanymi wynikami, w 1984 r. opracowano w OPOLiS metodę i szczegółowe warunki techniczne inwentaryzacji zdrowotnego i sanitarnego stanu lasu na podstawie barwnych zdjęć lotniczych w podczerwieni [Bychawski i in. 1984]. Technologia ta została wdrożona w dwóch przedsiębiorstwach geodezyjno-kartograficznych.

Oczywiście bardziej wymierny jest sposób „oceny” barwy dokonywany na drodze klasyfikacji cyfrowej, podczas której analizowane są wartości odbić spektralnych wyrażone wartościami liczbowymi. Należy jednak podkreślić, że interpretacja wizualna opracowana w dobie materiałów analogowych w IGIK-OPOLiS pozwalała na przeprowadzanie obiektywnej oceny kondycji drzew i opracowanie map obszarów leśnych przedstawiających klasy uszkodzenia drzewostanów. Opracowane przez prof. Wojciecha Bychawskiego matematyczne podstawy interpretacji zdjęć analogowych stały się nieco później fundamentem cyfrowych przetworzeń.

### • Korzystając z dziedzictwa prof. Bychawskiego

Zainteresowanie danymi teledetekcyjnymi wzrosło po 1989 r., kiedy dane te i mapy wzbawiono w większości przypadków statusu informacji niejawnych, a na początku lat 90. zostały uruchomione misje satelitów o wysokiej rozdzielczości. W wielu ośrodkach nadal prowadzone są prace badawcze poświęcone teledetekcji leśnej, które zainicjował Profesor. Obecnie w badaniach wykorzystywane są fotogrametryczne zdjęcia wielospektralne i hiperspektralne, zdjęcia satelitarne średnio- i wysokorozdzielcze, zdjęcia z bezzałogowych systemów latających, chmury punktów z naziemnego i lotniczego skanowania laserowego (TLS i ALS) w powiązaniu z wieloźródłowymi danymi o środowisku zgromadzonymi w systemach informacji przestrzennej oraz zaawansowanymi technologiami przetwarzania danych.

Elementem nawiązującym do stereoskopowej obserwacji analogowych zdjęć lotniczych są współczesne technologie teledetekcyjne nie tylko dostarczające informacji o numerycznym modelu terenu (NMT), numerycznym modelu pokrycia terenu (NMPT) i wysokościowym modelu koron (WMK), ale także wspierające two-

Źródło: IGIK 1979

zenie modeli i algorytmów do szacowania nadziemnej biomasy drzew i zasobności drzewostanów. Warto wspomnieć, że dzięki wsparciu prof. Bychawskiego pierwsze opracowanie dotyczące wykorzystania NMT w monitorowaniu lasów były wykonane w OPOLiS już na przełomie 1992 i 1993 roku.

Obecnie w PGL LP pilotażowo wdrażana jest metoda opracowana w ramach projektu REMBIOFOR (realizowanego pod kierunkiem IBL przez konsorcjum jednostek naukowych i PGL LP) mająca na celu określanie zasobności drzewostanów z wykorzystaniem danych ALS jako elementu składowego planu urządzenia lasu (PUL). Jest to alternatywa w stosunku do tradycyjnej metody statystyczno-matematycznej z użyciem warstw gatunkowo-wiekowych i pomiarów na kołowych powierzchniach próbnych. Nowe rozwiązanie obejmuje pozyskiwanie danych teledetekcyjnych, zakładanie naziemnych powierzchni próbnych (referencyjnych), przetwarzanie danych z użyciem specjalnego oprogramowania oraz zintegrowanie wyników w bazie danych powiązanej z Systemem Informatycznym Lasów Państwowych (SILP).

Inną powszechnie już stosowaną w PGL LP praktyką jest wykorzystywanie

lotniczych ortofotomap RGB i CIR przy realizacji prac urządzeniowych dla nadleśnictw. W poszczególnych jednostkach lub na zlecenie PGL LP wykonywane są także różne analizy i opracowania do oceny stanu lasów i zachodzących zmian z użyciem np. ortofotomapy, numerycznych modeli, wskaźników roślinności czy map klasyfikacyjnych. Poza danymi teledetekcyjnymi zastosowanie znajdują również dane przestrzenne (szczególnie Leśnej Mapy Numerycznej). PGL LP prowadzi lub jest współpartnerem w pracach badawczo-wdrożeniowych rozwijających technologie przetwarzania danych teledetekcyjnych w celu uzyskiwania coraz pełniejszej informacji o obszarach leśnych zarówno w skali lokalnej, regionalnej, jak i ogólnopolskiej.

Warto przypomnieć, że prof. Wojciech Bychawski przykładał wielką wagę do współpracy z innymi instytucjami, nawiązał bliskie kontakty naukowe ze specjalistami z Politechniki Warszawskiej, Instytutu Badawczego Leśnictwa, SGGW, Lasów Państwowych oraz Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej. Brał udział lub promował kontakty z instytucjami zagranicznymi (Interkosmos, EARSeL, IUFRO, FAO, US Forest Service czy EFI). Dorobek Profesora do dzisiaj służy kolejnym

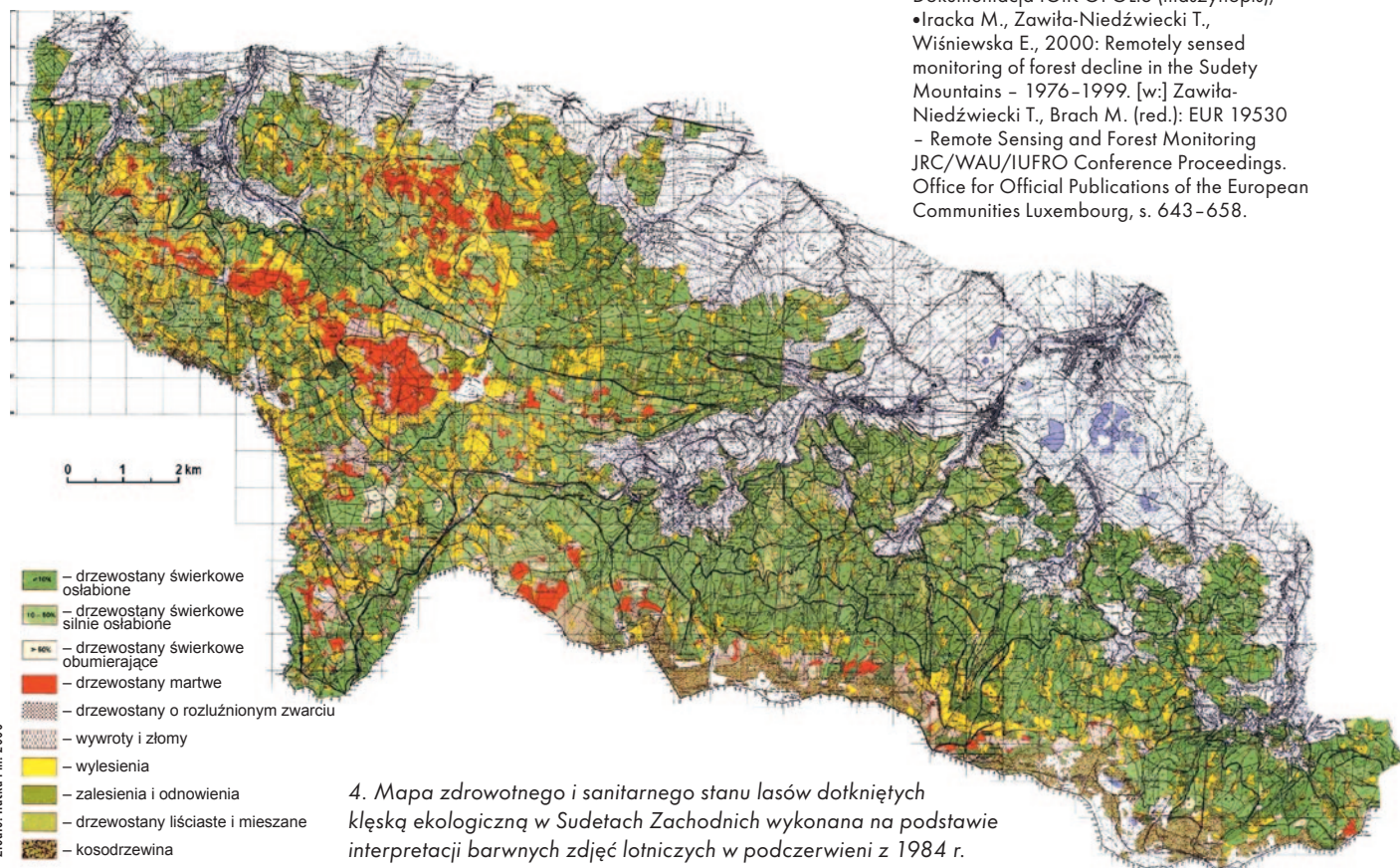
pokoleniom ekspertów teledetekcji, a jego prace są cytowane i przywoływane we współczesnych publikacjach.

**dr inż. Emilia Wiśniewska**  
główny specjalista Służby Leśnej w Wydziale Urządzenia Lasu Dyrekcji Generalnej LP  
**prof. Tomasz Zawila-Niedźwiecki**  
przewodniczący Komitetu Nauk Leśnych i Technologii Drewna PAN, dyrektor Centrum Koordynacji Projektów Środowiskowych (PGL LP)

#### Literatura

- Bychawski W., 1980: Zastosowanie lotniczych zdjęć spektrostrefowych do określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych. Prace IGiK, t. XXVII, z. 66;
- Bychawski W., Ciołkosz A., Iracka M., Zawila-Niedźwiecki T., 1988: Doświadczenia OPOLiS w badaniach degradacji lasów za pomocą teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Prace IGiK, t. XXXV, z. 81;
- Bychawski W., Iracka M., 1978a: Określanie, na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych, stref zagrożenia przemysłowego drzewostanów sosnowych, będących pod wpływem szkodliwego działania zakładów przemysłowych. Prace IGiK, t. XXV, z. 2 (59);
- Bychawski W., Iracka M., 1978b: Przyczyny różnicowania barw obrazów koron sosny na spektrostrefowym zdjęciu lotniczym. Prace IGiK, t. XXV, z. 3 (60);
- Bychawski W., Iracka M., Mozgawa J., 1977: Wykorzystanie lotniczych zdjęć spektrostrefowych do badań uszkodzeń drzewostanów sosnowych. Prace IGiK, t. XXIV, z. 55;
- Bychawski W., Iracka M., Zawila-Niedźwiecki T., 1984: Metoda określania zdrowotnego i sanitarnego stanu lasów na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych. Dokumentacja IGiK-OPOLiS (maszynopis);
- Iracka M., Zawila-Niedźwiecki T., Wiśniewska E., 2000: Remotely sensed monitoring of forest decline in the Sudety Mountains - 1976-1999. [w:] Zawila-Niedźwiecki T., Brach M. (red.): EUR 19530 - Remote Sensing and Forest Monitoring JRC/WAU/IUFRO Conference Proceedings. Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg, s. 643-658.

## MAPA ZDROWOTNEGO I SANITARNEGO STANU LASU



4. Mapa zdrowotnego i sanitarnego stanu lasów dotkniętych klęską ekologiczną w Sudetach Zachodnich wykonana na podstawie interpretacji barwnych zdjęć lotniczych w podczerwieni z 1984 r.