

ISSN0032-6224

**PRACE
INSTYTUTU
GEODEZJI
I KARTOGRAFII**

PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE
OF GEODESY AND CARTOGRAPHY

1994 t. **XLI**
z. **90**

Warszawa 1994

INSTYTUT GEODEZJI i KARTOGRAFII

Rada Wydawnicza
przy Instytucie Geodezji i Kartografii
Editorial Council
at the Institute of Geodesy and Cartography
Wojciech Bychawski (przewodniczący, chairman),
Andrzej Ciołkosz (zastępca przewodniczącego, deputy chairman),
Róża Butowit, Maria Dobrzycka, Wojciech Janusz, Teresa Baranowska,
Przedstawiciel Departamentu Głównego Geodety Kraju MGPIB,
Hanna Ciołkosz (sekretarz, secretary)

Redaktor naukowy wydawnictwa
"Prace Instytutu Geodezji i Kartografii"
Scientific Editor
of the Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography
Wojciech Bychawski

Zastępca redaktora naukowego wydawnictwa
"Prace Instytutu Geodezji i Kartografii"
Deputy Scientific Editor
of the Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography
Andrzej Ciołkosz

Zespół redakcyjny
Editorial Staff
Maria Dobrzycka, Wojciech Janusz, Krystyna Podlacha, Jolanta Sawicka

Adres Redakcji
Instytut Geodezji i Kartografii
00-950 Warszawa, ul. Jasna 2/4
Address of the Editorial Board
Institute of Geodesy and Cartography
00-950 Warsaw, Jasna 2/4 Str.
Poland

© Copyright by Instytut Geodezji i Kartografii

ISSN 0032-6224

Indeks 37357

IGiK, Warszawa 1994 r. nakład 220 egz.

Skład komputerowy, druk IGiK

TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI

**OCENA STANU LASU W EKOSYSTEMACH ZAGROŻONYCH
Z WYKORZYSTANIEM ZDJĘĆ SATELITARNYCH
I SYSTEMU INFORMACJI PRZESTRZENNEJ**

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	6
2. OMÓWIENIE PROBLEMATYKI.....	8
3. MATERIAŁY I METODA.....	10
4. WŁASNOŚCI ODBICIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO PRZEZ ROŚLINNOŚĆ W WIDZIALNYM, PODCZERWONYM I MIKROFALOWYM ZAKRESIE WIDMA.....	14
4.1. Zakresy optyczne.....	14
4.2. Zakresy mikrofalowe.....	16
4.3. Pomiary widmowe igieł świerkowych w Sudetach.....	17
4.4. LAI - wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści.....	28
5. ANALIZA ZDJĘĆ SATELITARNYCH SUDETÓW ZACHODNICH.....	31
5.1. Przetwarzanie zdjęć satelitarnych wykonanych w zapisie numerycznym.....	31
5.1.1. Odtwarzanie zdjęcia.....	31
5.1.2. Poprawianie obrazu.....	33
5.1.3. Geometria zdjęcia.....	37
5.1.4. Klasyfikacja zdjęcia.....	37
5.1.5. Operacje poklasyfikacyjne.....	40
5.2. Informacje o stanie lasu otrzymane ze zdjęć satelitarnych.....	41
5.2.1. Analiza zdjęć pozyskanych w zakresach optycznych.....	41
5.2.2. Analiza zdjęć pozyskanych w zakresach mikrofalowych.....	51
6. OCENA STANU LASU W SUDETACH ZACHODNICH NA PODSTAWIE ZDJĘĆ SATELITARNYCH.....	58
7. INTEGRACJA W SYSTEMIE INFORMACJI PRZESTRZENNEJ WIELOŹRÓDŁOWYCH DANYCH W CELU KOMPLEKSOWEJ ANALIZY STANU LASU W SUDETACH ZACHODNICH.....	64
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	70
9. LITERATURA.....	74

TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI

**EVALUATION OF FOREST STATE IN THREATENED ECOSYSTEMS
WITH THE USE OF SATELLITE IMAGES AND GIS**

CONTENTS

1. INTRODUCTION.....	6
2. DESCRIPTION OF THE PROBLEM.....	8
3. MATERIALS AND METHOD.....	10
4. SPECTRAL RESPONSE OF VEGETATION IN VISIBLE, INFRARED AND MICROWAVE RANGE OF ELECTROMAGNETIC SPECTRUM.....	14
4.1. Optical bands.....	14
4.2. Microwave bands.....	16
4.3. Spectral measurement of spruce needles at the Sudety mountains.....	17
4.4. LAI - leaf area index.....	28
5. ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES OF THE WESTERN SUDETY MOUNTAINS.....	31
5.1. Digital processing of satellite images.....	31
<i>5.1.1. Image restoration.....</i>	<i>31</i>
<i>5.1.2. Image enhancement.....</i>	<i>33</i>
<i>5.1.3. Image geometry.....</i>	<i>37</i>
<i>5.1.4. Image classification.....</i>	<i>37</i>
<i>5.1.5. Post-classification procedures.....</i>	<i>40</i>
5.2. Information on forest state at the western Sudety mountains.....	41
<i>5.2.1. Analysis of images recorded in optical bands.....</i>	<i>41</i>
<i>5.2.2. Analysis of images recorded in microwave bands.....</i>	<i>51</i>
6. ASSESSMENT OF FOREST STATE AT THE WESTERN SUDETY MOUNTAINS ON THE BASIS OF SATELLITE IMAGES.....	58
7. INTEGRATION WITHIN SPATIAL INFORMATION SYSTEM OF MULTISOURCE DATA IN ORDER TO MAKE COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE STATE OF FOREST AT THE WESTERN SUDETY MOUNTAINS.....	64
8. RECAPITULATION AND CONCLUSIONS.....	70
9. LITERATURE.....	74

Томаш Завила-Недзвецки

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСА В ОПАСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ
И СИСТЕМ ГЕОИНФОРМАЦИИ

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	6
2. ОБСУЖДЕНИЕ.ПРОБЛЕМАТИКИ.....	8
3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	10
4. СВОЙСТВА ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ВИДИМОМ ИНФРАКРАСНОМ И МИКРО- ВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА.....	14
4.1. Оптические диапазоны.....	14
4.2. Микроволновые диапазоны.....	16
4.3. Спектральные измерения еловых иголок в Судетах.....	17
4.4. LAI-индекс листовой поверхности растительного покрова....	28
5. АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ЗАПАДНЫХ СУДЕТОВ.....	31
5.1. Обработка спутниковых снимков, выполненных в цифровой записи.....	31
5.1.1. Воспроизведение снимков.....	31
5.1.2. Корректирование изображения.....	33
5.1.3. Геометрия снимка.....	37
5.1.4. Классификация снимка.....	37
5.1.5. Постклассификационные операции.....	40
5.2. Информации о состоянии леса, полученные со спутниковых снимков.....	41
5.2.1. Анализ снимков, полученных в оптических диапазонах.....	41
5.2.2. Анализ снимков, полученных в микроволновом диапазоне.....	51
6. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСА В ЗАПАДНЫХ СУДЕТАХ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ.....	58
7. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ В СИСТЕМЕ ГЕОИНФОРМАЦИИ МНОГОИСТОЧНИКОВЫХ ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЛЕСА В ЗАПАДНЫХ СУДЕТАХ.....	64
8. ИТОГИ И ВЫВОДЫ.....	70
9. ЛИТЕРАТУРА.....	74

TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI

**OCENA STANU LASU W EKOSYSTEMACH ZAGROŻONYCH
Z WYKORZYSTANIEM ZDJĘĆ SATELITARNYCH
I SYSTEMU INFORMACJI PRZESTRZENNEJ**

1. WSTĘP

W ostatnich latach jesteśmy świadkami szybkiego rozwoju satelitarnych technik badania zasobów naturalnych. Zdjęcia satelitarne są dziś materiałem w pełni kartometrycznym, o ogromnym zasobie informacji, na którym można dokonywać wielu pomiarów i obserwacji wzbogacających warsztat każdego kto zajmuje się problemami środowiska naturalnego.

Od wielu lat są prowadzone prace zmierzające do operacyjnego wykorzystywania najnowszej generacji zdjęć satelitarnych w ocenie stanu lasu oraz kartowania zmian, jakie zachodzą w środowisku leśnym. Efektem takich właśnie działań jest niniejsza praca, która powstała dzięki badaniom finansowanym przez Generalną Dyрекcję Lasów Państwowych (temat badawczy: *Ocena stanu lasu w ekosystemach zagrożonych z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych*) oraz Komisję Wspólnot Europejskich - CEC - DG XII - JRC (temat badawczy: *Wykorzystanie systemów informacji przestrzennej w leśnictwie*).

W niniejszej pracy omówiono genezę badań nad wykorzystaniem zdjęć satelitarnych w leśnictwie (rozdz. 2), przedstawiono metodykę i materiał badawczy (rozdz. 3), a także teoretyczne podstawy teledetekcji lasu (rozdz. 4). Następnie omówiono wyniki badań nad wyborem odpowiednich zdjęć satelitarnych i metod ich przetwarzania (rozdz. 5) oraz możliwości oceny stanu lasu na podstawie zdjęć satelitarnych (rozdz. 6). Przedstawiono również koncepcję integracji wieloźródłowych informacji o lesie, niezbędnych przy interpretacji zdjęć satelitarnych (rozdz. 7). Wyniki badań weryfikowano porównując je do danych terenowych i rezultatów interpretacji zdjęć lotniczych.

Pragnę wyrazić moją wdzięczność panu dr. inż. Jerzemu Smykale, który był inicjatorem podjęcia omawianych w tej pracy badań. Dziękuję także Koleżankom i Kolegom z OPOLIS-Ośrodka Teledetekcji i Informacji Przestrzennej Instytutu Geodezji i Kartografii, z Zakładu Urządzania Lasu Instytutu Badawczego Leśnictwa oraz z Laboratorium Teledetekcji i Urządzania Lasu Uniwersytetu w Gandawie, z którymi miałem przyjemność współpracować podczas realizacji badań opisanych w niniejszej pracy. Szczególną wdzięczność za wydatną pomoc i wieloletnią współpracę pragnę wyrazić pani mgr Marii Irackiej, panu inż. Boudewijnowi De Rooverowi, panu dr.inż. Zbigniewowi Bochenkowi i panu mgr.inż. Mirosławowi Grzybowi.

2. OMÓWIENIE PROBLEMATYKI

Już od ponad trzech dziesięcioleci w europejskich lasach obserwuje się wzrost szkód powodowanych przez przemysłowe zanieczyszczenia powietrza. Największe straty są notowane w Niemczech, Polsce, Czechach i Austrii. Wynikają one nie tylko z emisji lokalnych, ale w dużej mierze także z przenoszenia przez wiatr pyłów i gazów, pochodzących z odległych emitorów. Z ogólnej ilości zanieczyszczeń atmosfery opadających na terenie Polski 50% jest emitowane poza jej granicami. Już w końcu lat 80. stwierdzono, że wskutek zanieczyszczeń przemysłowych zwiększa się powierzchnia drzewostanów uszkodzonych (Szujewski, 1988).

Szczególnie groźna sytuacja powstała w górach, gdzie lasotwórczymi są jodła, świerk i buk, a więc gatunki najbardziej wrażliwe na zanieczyszczenia powietrza. W górach specyficzny układ prądów powietrza powoduje ponadto, że zbocza o określonej ekspozycji (przeważnie zachodniej) są szczególnie narażone na skażenia.

Gwałtowne zmiany środowiska powodują potrzebę podejmowania wielkoobszarowych ocen stanu lasu oraz kartograficznej prezentacji wyników. W ubiegłych latach stosowano w tym celu zdjęcia lotnicze, zarówno panchromatyczne, jak i spektrostrefowe, otrzymując zadowalające rezultaty. Na potrzeby Lasów Państwowych Ośrodek Teledetekcji i Informacji Przestrzennej Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie opracował metodę inwentaryzacji stanu lasów sfotografowanych na lotniczych zdjęciach spektrostrefowych (Bychawski i in., 1984) oraz dokonywał na ich podstawie ocen kondycji lasów iglastych, a Biuro Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej w Warszawie zajmowało się także wykorzystywaniem takich zdjęć do oceny lasów liściastych (Barszczewski, 1991). Jednakże w przypadku ocen dużych obszarów leśnych stosowanie zdjęć lotniczych jest pracochłonne, a przede wszystkim kosztowne. Dlatego też w wielu krajach sięga się po zdjęcia satelitarne, z pewnością mniej dokładne, ale pozwalające na wnioskowanie o zmienności kondycji lasu na dużych obszarach.

Początki wykorzystania zdjęć satelitarnych do badania lasów sięgają lat siedemdziesiątych, kiedy to wprowadzono na orbitę okołozemską pierwszego satelitę serii Landsat. Niska rozdzielczość przestrzenna i spektralna zdjęć wykonanych przez pierwsze satelity teledetekcyjne, umożliwiała jedynie wydzielenie drzewostanów iglastych, liściastych i mieszanych (Ciołkosz i Poławski, 1980) oraz ogólne analizowanie rozkładu zniszczeń lasów w rejonach przemysłowych (Bychawski i in., 1980).

Wraz ze wzrostem dokładności obrazowania powierzchni Ziemi, informacje ze zdjęć satelitarnych stawały się coraz bardziej precyzyjne. W USA i Kanadzie identyfikowano na ich podstawie drzewostany jednogatunkowe, z podziałem na klasy wieku oraz wydzieleno różne stopnie zmieszania gatunkowego (Beaubien,

1979). Zarówno w Ameryce, jak i Europie prowadzono prace nad wykorzystaniem zdjęć satelitarnych do oceny stanu lasu (Bychawski i in., 1990) oraz inwentaryzacji i monitorowania lasów zdegradowanych (Lillesand i in., 1986; Wastenson i in., 1987; Kadro, 1988; Zawila-Niedźwiecki, 1990a, 1993). Opracowywano także sposoby wykorzystania informacji pozyskiwanej z pułapu kosmicznego do inwentaryzacji pożarów i pożarysk (Estell, 1980; Husson, 1984; Chuvieco, 1989; Chuvieco i Congalton, 1989; Lopez Garcia i Caselles, 1991; Karlikowski i Zawila-Niedźwiecki, 1993). Zdjęcia satelitarne umożliwiały precyzowanie zasięgu zniszczeń owadzi, ocenę ich dynamiki, szacowanie szkód oraz kartograficzną prezentację ich występowania (Eztkov i in., 1986). Informacje pozyskiwane z pułapu satelitarnego służyły także do szacowania zapasu drewna (Suchich, 1986; Ciołkosz i Zawila-Niedźwiecki, 1990) oraz pozwalały niekiedy na wyeliminowanie zdjęć lotniczych w zakresie analiz pożarów i pogorzeliisk (Eztkov i in., 1986).

Uznając powagę zagrożeń środowiska naturalnego, a zwłaszcza zamierania lasów w Europie Środkowej, autorytatywne osobistości oraz instytucje narodowe i regionalne podkreślają konieczność wypracowania obiektywnych metod oceny stanu lasu, które spełniałyby wymagania monitoringu (IIASA-IUFRO, 1987). Jednocześnie wskazuje się, że teledetekcja satelitarna może odegrać dużą rolę w monitorowaniu lasu (IIASA, 1987; Paivinen i in., 1993). Z inicjatywy IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) powołano w 1986 r. zespół ekspertów Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ do spraw satelitarnej detekcji uszkodzeń lasu (Zawila-Niedźwiecki, 1990b). W jego skład, ze strony Polski zaproszono przedstawicieli OPOLIS-Ośrodka Teledetekcji i Informacji Przestrzennej Instytutu Geodezji i Kartografii oraz Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej. W wyniku prac tego zespołu, w roku 1990 powstał projekt LAROE (Large Area Operational Experiment for Forest Damage Monitoring in Europe Using Satellite Remote Sensing).

Projekt LAROE jest rozszerzeniem badań nad transgranicznym przemieszczaniem zanieczyszczeń powietrza, w realizacji których bierze udział 30 krajów europejskich. W toku tych prac prowadzi się analizy stanu lasów, wykorzystując do tego tradycyjne metody pozyskiwania danych. Informacje uzyskane w wyniku realizacji wspomnianego projektu są corocznie dostarczane rządowi poszczególnych krajów w postaci zestawień statystycznych.

Pożądanym uzupełnieniem tych informacji powinien być monitoring satelitarny. Zakłada się bowiem, że zdjęcia satelitarne i opracowywane na ich podstawie mapy umożliwią przestrzenne pokazanie rozkładu uszkodzeń lasów na poziomie zarówno krajowym, jak i regionalnym. Zatem sucha informacja statystyczna nabrałaby nowego wymiaru - zostałaby przyporządkowana przestrzennie.

Głównym celem eksperymentu LAROE jest opracowanie i przetestowanie metody, która integrowałaby dane gromadzone za pomocą teledetekcji z informacjami o uszkodzeniach lasów, otrzymywanymi w toku badań tradycyjnych, prowadzonych w ramach różnych programów. W założeniach eksperymentu

postanowiono skartować aktualny zasięg i stopień uszkodzeń lasów, scharakteryzować ilościowo zmiany powierzchniowe i stopień uszkodzenia drzewostanów w okresie ostatniego dwudziestolecia oraz opracować i przetestować metodę wykorzystującą teledetekcję do monitoringu i oceny stanu lasów.

Przewiduje się, że odpowiednio przetworzone zdjęcia satelitarne powinny dostarczyć wielu informacji, którymi można by uzupełnić opracowania statystyczne, charakteryzujące stan zdrowotny lasów, a także raporty monitoringu lasów dokonywane na poziomie regionalnym. Barwne mapy, jako pochodna przetwarzania zdjęć satelitarnych, pokazując przestrzenne rozmieszczenie uszkodzeń na różnych poziomach, powinny dać pełniejsze zrozumienie zestawień statystycznych, przypisując je określonym obszarom w przestrzeni. Zebrane w formie cyfrowej dane dotyczące uszkodzeń lasów powinny być wykorzystywane w systemach informacji geograficznej do wszechstronnej charakterystyki drzewostanów.

Program Środowiskowy Narodów Zjednoczonych (UNEP) zdecydował, że ośrodek GRID w Genewie będzie pełnił rolę koordynatora eksperymentu LAROE, zajmując się także dystrybucją osiągniętych wyników. GRID udzieli także pomocy w opublikowaniu map i raportów. Eksperyment jest nadzorowany przez Europejską Komisję Leśną FAO, która w tym celu powołała Radę Doradczą, w której skład weszli przedstawiciele Polski, Czech, Niemiec, Francji, Finlandii, USA, Szwecji i UNEP/GRID.

Projekt LAROE jest wykonywany na poligonach badawczych w Polsce, Niemczech, Czechach. Polskie poligony badawcze są zlokalizowane w Sudetach, Tatrach i Beskidach. Niniejsza praca, przedstawiająca pierwszą część polskiego wkładu do międzynarodowego projektu dotyczy lasów sudeckich, gdzie badania są najbardziej zaawansowane i gdzie otrzymano już pewne wyniki zezwalające zarówno na ocenę metody, jak i wartości informacji dostarczanych z jej pomocą.

3. MATERIAŁY I METODA

Badania opisywane w niniejszej pracy były prowadzone w dwóch zakresach. W pierwszym szukano relacji pomiędzy terenowymi parametrami drzewostanów a ich charakterystykami spektralnymi, w drugim zaś analizowano dane zlokalizowane przestrzennie.

W celu realizacji pierwszego zakresu prac założono 523 powierzchnie testowe zlokalizowane na 3 poligonach badawczych:

Poligon 1 - Nadleśnictwo Szklarska Poręba - obręby Szklarska Poręba i Piechowice

Poligon 2 - Nadleśnictwo Duszniki - obręby Polanica i Duszniki

Poligon 3 - Nadleśnictwo Świdnica - Obręb Bielawa oraz Nadleśnictwo Jugów - Obręb Jugów

Poligony te obejmują sudeckie drzewostany świerkowe w pasmach Gór Izerskich i Karkonoszy, Gór Sowich i Gór Stołowych.

Terenowej charakterystyki drzewostanów na poligonach badawczych dokonano na podstawie instrukcji opracowanej w Instytucie Badawczym Leśnictwa (Grzyb i Dmyterko, 1991). Zgodnie z tą instrukcją, na trzech wymienionych poligonach zlokalizowano wspomniane powierzchnie testowe, z których każda obejmowała obszar 1-10 ha, w jednorodnych drzewostanach świerkowych. Powierzchnię testową stanowi jedno wydzielenie taksacyjne, które opisywano na podstawie pomiarów i obserwacji dokonywanych na powierzchniach kołowych. Informacje zbierane na powierzchniach testowych były kodowane na specjalnych formularzach, podzielonych na bloki:

- 1) blok adresowy (RDLP, nadleśnictwo, obręb, numer poligonu),
- 2) opis warunków terenowych (rodzaj terenu, forma ukształtowania, nachylenie, wystawa, wysokość nad poziomem morza, rodzaj pokrywy i stopień pokrycia, wilgotność i rodzaj gleby oraz stopień pokrycia przez rumosz skalny, głazy, skały itp.),
- 3) opis drzewostanu (struktura, warstwa, skład gatunkowy, wiek, forma zmieszania, zwarcie, przeciętna pierśnica, przeciętna wysokość, wysokość posadowienia korony, średnica korony, liczba drzew na jednostce powierzchni, a w tym martwych i zamierających),
- 4) ocena uszkodzenia drzewostanu (defoliacja-Df, odbarwienie-Dc oraz kondycja drzew-Dm).

Defoliację i odbarwienie oceniano zgodnie z zaleceniami ICP-Forest (International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), a kondycję drzew na podstawie stanu aparatu asymilacyjnego, przyrostu wysokości oraz żywotności drzew (Dmyterko i Grzyb, 1990).

Drugi zakres badań - analizy przestrzenne - były prowadzone na terenie Gór Izerskich i Karkonoszy, w drzewostanach należących do Karkonoskiego Parku Narodowego oraz obrębów Świeradów, Szklarska Poręba, Piechowice i Śnieżka.

Dla obszaru badań zgromadzono serię zdjęć wykonywanych przez satelity Landsat MSS, Landsat TM, Spot, Kosmos i ERS-1, poczynawszy od 1982 r. Wytypowane na zdjęciach satelitarnych obszary o zróżnicowanym drzewostanie i stopniu uszkodzenia zostały sfotografowane na lotniczym filmie spektrostrefowym Kodak Aerochrome 2443. Wykorzystywano też archiwalne zdjęcia lotnicze z 1984 r, wykonane na rosyjskim filmie SN-10.

Równocześnie na wybranych powierzchniach testowych zostały wykonane uzupełniające pomiary spektralne odbicia promieniowania elektromagnetycznego (w widzialnym i podczerwonym zakresie spektrum) przez igliwie zebrane z drzew w różnym stopniu narażonych na działanie zanieczyszczeń, a więc o zróżnicowanej zawartości chlorofilu oraz wody. Parametry te zmieniają się bowiem zależnie od stopnia uszkodzenia roślin.

Na wybranych powierzchniach testowych wykonano także pomiary powierzchni projekcyjnej igieł (LAI - Leaf Area Index). W pomiarach tych wykorzystano metodę porównania radiacji w zakresie widzialnym (do 490 nm), docierającej do powierzchni koron oraz do dna lasu. Celem tych prac było stwierdzenie, czy według wskaźnika LAI, mierzonego specjalistycznym sprzętem (LI-COR), można opisać kondycję lasu w sposób obiektywny. Obiektywizacja oceny kondycji lasu ma szczególne znaczenie w przypadku metod teledetekcyjnych, które ze swej istoty generalizują obraz stanu lasu. Stosowane w leśnictwie metody oceny kondycji lasu bazują na szacunkowej ocenie kondycji drzew. Wprowadzenie obiektywnej metody oceny kondycji drzewostanów mogłoby więc usprawnić ich monitorowanie. Wyniki przeprowadzonych analiz upoważniły do wykorzystywania wskaźnika LAI do charakteryzowania kondycji drzewostanów.

Zdjęcia lotnicze, wykonane na filmie Kodak Aerochrome 2443, posłużyły do opracowania mapy charakteryzującej aktualny stan lasu oraz do wyboru powierzchni testowych, niezbędnych w nadzorowanej klasyfikacji treści zdjęć satelitarnych. Zdjęcia satelitarne były poddane interpretacji wizualnej, mającej na celu określenie cech charakteryzujących drzewostany, a przede wszystkim ich uszkodzenia. Dużą pracochłonnością interpretacji wizualnej oraz koniecznością integracji wieloźródłowych danych, zgromadzonych w numerycznych bazach danych, spowodowały, że zdjęcia satelitarne, które były wykonane w zapisie cyfrowym, poddano interpretacji z wykorzystaniem cyfrowych oraz hybrydowych metod klasyfikacji.

Spośród metod klasyfikacji cyfrowej wybrano tzw. klasyfikację nadzorowaną, wymagającą znajomości charakteru obiektów na polach testowych. Przy zakładaniu tych pól wykorzystano informacje pozyskiwane zarówno w toku inwentaryzacji terenowej, jak również uśrednione informacje zarejestrowane na zdjęciach lotniczych. Porównanie wieloterminowych zdjęć lotniczych i satelitarnych pozwoliło na opracowanie map pokazujących zmiany, jakie zaszły w analizowanych drzewostanach w latach 1984-90.

Podczas badań stanu lasu w Sudetach zgromadzono ogromną ilość danych. Dlatego też do ich analizowania wykorzystano leśny system informacji przestrzennej (SIP), który powstał w IGIK-OPOLIS, na bazie sprzętu i oprogramowania INTERGRAPH.

Zdjęcia lotnicze interpretowano wizualnie na modelu stereoskopowym, z wykorzystaniem kartofleksu i interpretoskopu, natomiast do przetwarzania zdjęć satelitarnych i integracji danych wykorzystano systemy ERDAS i INTERGRAPH. Korzystano także z oprogramowania STATGRAPHICS umożliwiającego prowadzenie analiz statystycznych.

Systemy przetwarzania obrazów (ERDAS I INTERGRAPH) umożliwiły przeprowadzenie interaktywnych operacji na zdjęciach satelitarnych, a szczególnie: przeprowadzanie korekcji radiometrycznych, geometryzację zdjęć, lokalizację na zdjęciach powierzchni testowych założonych w terenie, określenie wielkości odbicia promieniowania elektromagnetycznego przez różne drzewostany oraz

wykonanie klasyfikacji treści zdjęć. Obiektowa baza danych umożliwiła określenie wystaw i spadków terenu, pokrytego przez poszczególne drzewostany oraz ułatwiła analizę statystyczną.

Wyniki inwentaryzacji drzewostanów były analizowane w odniesieniu do charakterystyk widmowych powierzchni testowych, zarejestrowanych w 7 zakresach długości fal, w których wykonywane są zdjęcia satelitarne TM. Do szczegółowych analiz wybrano właśnie zdjęcia wykonane skanerem Thematic Mapper, gdyż jak wynika z dotychczasowych badań (Bychawski, Zawila-Niedźwiecki, 1990) są one najbardziej przydatne do oceny kondycji drzewostanów, a to dzięki rejestracji fal zaliczonych do średniej podczerwieni. Analizy dotyczyły zarówno kanałów surowych, jak i wagowanych (TM 4/3 i TM 5/4), indeksu roślinności:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3}}$$

wskaznika jasności

$$\text{BR} = \sqrt{(\text{TM3})^2 + (\text{TM4})^2}$$

a także trzech składowych głównych (*principal components*): PC1, PC2 i PC3.

Zdjęcie powstałe w wyniku wagowania surowych kanałów 4 i 3 obrazują zmiany zasobności zielonej masy, a kanałów 5 i 4 służą do wykrywania uszkodzeń. Wagowania te są szczególnie przydatne do wizualnej interpretacji zdjęć satelitarnych. Indeks roślinności i wskaźnik jasności stosuje się do określania zasięgu występowania roślinności oraz określania jej zasobności w aparat asymilacyjny.

Tworzenie nowych zdjęć metodą składowych głównych służy kumulacji danych zawartych w kilku kanałach i redukcji nadmiaru informacji. Ich rolą jest zastąpienie oryginalnych zdjęć, wykonywanych w kilku kanałach, zdjęciami sztucznymi, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich liczby. I tak, w przypadku 7 zakresów widmowych TM, zastosowanie analizy składników głównych pozwala na kumulację informacji w trzech nowo utworzonych kanałach, przy czym zdjęcie w kanale PC1 zawiera około 90% informacji, w kanale PC2 - ponad 9%, a PC3 - niespełna 1%. Zdecydowana większość danych zawarta jest więc w sztucznym kanale PC1, jednakże eliminacja dwóch pozostałych byłaby błędem, gdyż z interpretacyjnego punktu widzenia w tych właśnie kanałach mogą być zawarte istotne informacje dotyczące pewnych cech przyrodniczych.

Wszystkie pozyskiwane podczas badań informacje opisowe gromadzono w bazach danych relacyjnych, a informacje przestrzenne w bazach danych obiektowych, które utworzyły system informacji przestrzennej (SIP). Umożliwiło to przeprowadzenie wielu analiz przestrzennych, a między innymi analiz związków pomiędzy charakterystykami spektralnymi drzewostanów a ich parametrami terenowymi, które były przeprowadzone w odniesieniu do całej bazy danych, jak

również z uwzględnieniem poszczególnych wystaw. Podział na wystawy ma znaczenie ze względu na różnice w oświetleniu poszczególnych stoków. Zdjęcia satelitarne są na ogół wykonywane w godzinach rannych, kiedy słońce jest jeszcze stosunkowo nisko i gdy w terenie górskim niektóre wystawy znajdują się w cieniu.

4. WŁASNOŚCI ODBICIA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO PRZEZ ROŚLINNOŚĆ W WIDZIALNYM, PODCZERWONYM I MIKROFALOWYM ZAKRESIE WIDMA

4.1. Zakresy optyczne

Każdy obiekt, a więc i roślinność, pochłania, odbija i transmituje promieniowanie elektromagnetyczne zgodnie z prawem zachowania energii:

$$I = R + A + T + E,$$

gdzie: I - promieniowanie padające,
R - suma odbicia,
A - suma pochłaniania,
T - suma transmisji,
E - suma emisji.

Urządzenia teledetekcyjne pracują w większości na zasadzie rejestracji promieniowania odbitego. Wartość odbicia jest różna dla różnych gatunków roślin i zmienia się w czasie, w zależności od stanu fenologicznego. Na wartość odbicia od aparatu asymilacyjnego promieniowania elektromagnetycznego, mającego najważniejsze znaczenie w rozpoznawaniu struktury i zdrowotności roślin, wpływają: grubość kutykuli, zawartość wody, ilość pigmentów, a także usytuowanie liści w koronie w stosunku do kierunku padania promieniowania słonecznego (cień).

Ilość przepuszczanego i odbitego przez liście promieniowania zależy także od kąta padania promieni. Współczynnik odbicia jest prawie stały, gdy kąt padania nie przekracza 50°. Dla kątów 50-90° współczynnik odbicia gwałtownie rośnie, w wyniku pojawienia się efektu odbicia lustrzanego. W zakresie 0-50° stały jest również współczynnik przepuszczania, natomiast gdy kąt padania rośnie od 50° do 90°, współczynnik przepuszczania maleje. Ilość promieniowania pochłanianego pozostaje w zasadzie stała w zakresie kąta padania 0-80° (Monteith, 1977).

W lasach współczynnik odbicia jest niższy niż na polach i wynosi ok. 0.1. Różnice te tłumaczy się zmianami stopnia "uwięzienia" promieniowania w wyniku wielokrotnego odbicia między sąsiednimi liśćmi i łodygami. Tak mały współczynnik odbicia powoduje, że obraz lasu na zdjęciach wykonanych w widmie widzialnym jest zawsze ciemny. Wartości współczynnika odbicia promieniowania elektromagnetycznego dla różnych gatunków roślin zmieniają się wraz ze zmianą kąta wzniesienia Słońca. Minimalne wartości współczynnika odbicia notuje się, gdy Słońce zbliża się do zenitu, natomiast gdy obniża się do linii horyzontu współczynnik odbicia rośnie; maleje wtedy możliwość wielokrotnego rozpraszania promieniowania w listowiu.

Omawiając zbiorowiska roślinne należy brać pod uwagę modyfikacje wartości odbicia w stosunku do rezultatów uzyskanych dla pojedynczych liści. Jest to wynikiem różnic w gęstości pokrycia (odbicie od gleby i cienia przy niepełnym zwarciu), pokroju roślin (kąt ustawienia gałęzi i forma koron), organizacji przestrzennej (więźba, rodzaj i intensywność zabiegów hodowlanych) itp.

Wartość odbicia dla lasu jest wypadkową odbicia od aparatu asymilacyjnego, kory, gałęzi i pokrywy glebowej. W zakresie widzialnym odbicie od lasu jest 5-10 - krotnie niższe niż odbicie od samego aparatu asymilacyjnego, a w zakresie bliskiej podczerwieni około 2 - krotnie niższe, przy zachowaniu stałych proporcji między drzewostanami liściastymi i iglastymi (większe odbicie od gatunków liściastych niż iglastych).

Słabe odbicie od roślin w zakresie widzialnym jest powodowane przez chloroplasty i inne organelle komórkowe. W chloroplastach umiejscowione są grana zawierające chlorofil. Wymiary gran, rzędu 0.5-0.05 μm , są porównywalne z długością fal widzialnych, więc promieniowanie w tym zakresie jest zakłócanie przez elementy o podobnej wielkości, a światło penetrując chloroplast ulega silnemu rozproszeniu. Inne organa komórkowe (mitochondria, rybosomy, jądro) także, chociaż w mniejszym stopniu, przyczyniają się do rozpraszania promieniowania słonecznego. Chlorofil nie absorbuje fal rzędu 0.55 μm , a więc w tym zakresie występuje maksimum odbicia promieniowania elektromagnetycznego. Natomiast zakres niebieski i czerwony to obszary silnej absorpcji chlorofilu, co na krzywej odbicia daje minima w zakresie 0.45 i 0.65 μm .

Barwniki liści pochłaniają krótkie zakresy fal (0.35-0.75 μm). Promieniowanie absorbowane przez chlorofil w zakresie niebieskim (0.4 μm) i czerwonym (0.675 μm) dostarcza energii niezbędnej do fotosyntezy. Karoten i ksantofil charakteryzuje o wiele mniejsza absorpcja, która uwidacznia się głównie jesienią, w czasie zaniku chlorofilu. Na wielkość współczynnika jasności spektralnej w zakresie widzialnym wpływa też nalot woskowy i pokrywa włoskowa liści, zwiększając go w zakresie żółto-czerwonym (0.60-0.64 μm).

W przedziale 0.75-1.3 μm odbicie promieniowania elektromagnetycznego od zielonych części roślin jest znacznie większe niż odbicie w zakresie widzialnym. Ten wzrost odbicia w podczerwieni wynika z odbicia i rozpraszania tego zakresu promieniowania w miękiszu gąbczastym. Chloroplasty nie pochłaniają promieni podczerwonych, gdyż są dla nich przezroczyste. Głównym elementem modyfikującym wielkość odbicia w tym przedziale jest struktura wewnętrzna liści, tzn. grubość kutykuli, rozwinięcie hypodermy, wielkość przetchlinek, parenchyma palisadowa i mezofil. Gdy roślina usycha, mezofil traci swą strukturę i odbicie w bliskiej podczerwieni ulega zmianie. Mezofil jest różnie zbudowany u różnych roślin i dlatego osobniki te odbijają fale w zakresie bliskiej podczerwieni, w różnym stopniu. W zakresie promieniowania powyżej 1.5 μm własności spektralne liści zależą od zawartości wody.

4.2. Zakresy mikrofalowe

W zakresach mikrofalowych o spektralnych własnościach obiektów decydują ich cechy, takie jak: chropowatość, skład chemiczny, temperatura, własności dielektryczne i rezystencyjne, a także polaryzacja wiązki radarowej i długość fal.

Radiolokacyjne systemy obrazowe wykorzystują promieniowanie mikrofalowe o długości fal od 1 cm do 1 m, emitując sygnały w wiązках ciągłych lub pulsacyjnych o mikrosekundowym czasie trwania. Promieniowanie to jest charakteryzowane przez długość (λ) oraz częstość (f), amplitudę, fazę i polaryzację fali, a także kąt padania na powierzchnię Ziemi (Θ). Częstość i długość fali pozostają w stałej zależności, opisanej wzorem: $f = c\lambda^{-1}$, gdzie: f oznacza częstość wyrażoną w Hz ($1 \cdot \text{sec}^{-1}$), $c = 3 \cdot 10^8 \text{ msec}^{-1}$, a λ jest długością fal wyrażoną w m.

Obrazowe systemy radiolokacyjne dostarczają zdjęć, na których każdy piksel ma wartość odpowiadającą natężeniu promieniowania odbitego od obiektów "oświetlonych" wysłaną wiązką mikrofal. Natężenie promieniowania rejestrowanego przez antenę odbiorczą można wyznaczyć ze wzoru:

$$W_r = \frac{W_t G_t A_r \sigma_0}{(4R^2)^2}$$

gdzie: W_t - natężenie wyemitowanej wiązki,
 G_t - zakres pola widzenia radaru,
 A_r - powierzchnia anteny odbiorczej,
 σ_0 - współczynnik wstecznego odbicia promieniowania przez dany obiekt,
 R - odległość anteny nadawczej od obiektu.

Współczynnik wstecznego odbicia σ_o zależy od: długości fali (częstości), kąta padania promieniowania, polaryzacji wiązki radarowej oraz własności dielektrycznych i geometrycznych obiektu. Jest on jednostką niemianowaną, ale często wyraża się go w decybelach (dB): $\sigma_{o(dB)} = 10 \log \sigma_o$.

Długość (częstość) promieniowania determinuje zasięg przenikania fal w głąb obiektu oświetlonego wiązką promieniowania radarowego. Im większa długość fal (mniejsza częstość), tym głębiej sięga penetracja tego promieniowania. I tak, w przypadku lasu, fale o długości $\lambda = 3$ cm (zakres X) zatrzymują się przy pierwszym zetknięciu z obiektem, a więc informacje rejestrowane na obrazie są związane z górną powierzchnią koron drzew. Natomiast fale o długości $\lambda = 23$ cm (zakres L) penetrują wewnątrz drzewostanu, informacje zarejestrowane na obrazie będą więc dotyczyły pni drzew i wnętrza lasu. Woda jest całkowicie nieprzezroczysta dla mikrofal, które ulegają silnemu od niej odbiciu, i dlatego zmiana wilgotności powierzchni liści i gałęzi może zmniejszać możliwość przenikania promieni w głąb lasu.

Badania wykonane w IGiK-OPOLIS (Zawiła-Niedźwiecki i in., 1994) wykazują, że zmienność współczynnika odbicia wstecznego (σ) w wysokim stopniu jest zależna od wieku drzewostanów, pierśnicy, średnicy korony oraz liczby drzew na jednostce powierzchni.

4.3. Pomiary widmowe igieł świerkowych w Sudetach

W celu sprawdzenia przydatności optycznego przedziału widma do oceny kondycji roślin, wykonano pomiary charakterystyk spektralnych igieł świerkowych pobranych w Karkonoszach z drzew o różnej kondycji, rosnących na wysokości od 534 m n.p.m. do 1000 m n.p.m. (Rock i in. 1992). Wstępne pomiary, wykonane w 1990 r. obejmowały igły przedostatniego rocznika, zebrane w Sudetach, a następnie przewiezione do laboratorium Uniwersytetu New Hampshire. Właściwa seria pomiarów wykonana została w 1991 r. po przetransportowaniu z USA do Polski całej aparatury do konserwacji próbek oraz pomiarów odbicia spektralnego. W ramach tych pomiarów analizowano oddzielnie trzy roczniki igieł.

Pomiary charakterystyk spektralnych wykonywano za pomocą spektrometru VIRIS (Visible/Infrared Intelligent Spektrometer) skonstruowanego przez Geophysical Environmental Research Corporation, Millbrook, NI. Spektrometr ten charakteryzuje się rozdzielczością spektralną rzędu 0,2 nm w zakresie 400 - 1000 nm oraz rzędu 400 nm w zakresie 1000 - 2500 nm. Pole widzenia spektrometru wynosi 4,0 x 1,5 cm, a pomiary wykonuje się oświetlając zebrane z drzew igliwie żarówkami 30 W/10,8 V, pod kątem 45 stopni z odległości 50 cm. Każda mierzona próbka zawiera tę samą masę igieł i dla każdej z nich wykonywano dwukrotne pomiary.

W roku 1990 pobierano igły w drzewostanach o różnej zdrowotności, rosnących na różnych wysokościach nad poziomem morza :

- I próba obejmowała igliwie z drzew o lokalnie najlepszej kondycji, rosnących na wysokości 950 m npm,
- II próba obejmowała igliwie pobrane z drzew w wieku 6 - 8 lat, zlokalizowanych na wysokości 1400 m npm,
- III próba obejmowała igliwie pobrane z 40 letniego drzewostanu na wysokości 1100 m npm,
- IV próbę (porównawczą) stanowiły pędy pobrane z drzew rosnących na terenie Uniwersytetu New Hampshire.

W roku 1991 próbki pobierano z 6 stanowisk o wystawach północnych. Na każdym stanowisku igliwie pozyskiwano z 5 drzew, z połowy długości wschodniej części korony. Północne wystawy oraz wschodnie części koron drzew były wybrane tak aby igliwie reprezentowało aparat asymilacyjny najmniej narażony na zanieczyszczenie powietrza (Rock i in. 1992). Charakterystyki tych powierzchni testowych znajdują się w tablicy 1.

Tablica 1

Wykaz powierzchni, z których pobierano igliwie do pomiarów spektralnych

Nr próbki	Obręb i oddział	Wysokość npm	Wiek drzew	Opis powierzchni
1	Szklarska P. 50 a	793	28	Mała powierzchnia żyjących drzew
2	Szklarska P. 27 d	747	48	Mała powierzchnia żyjących drzew
3	Szklarska P. 27	640	67	Drzewa zdrowe stała pow. ZULIBL
4	Szklarska P. 64 f	945	46	Bardzo silne uszkodzenia
5	Świeradów 434	1000	33	Bardzo silne uszkodzenia
6	Piechowice 219 a	534	57	Najzdrowsze drzewa

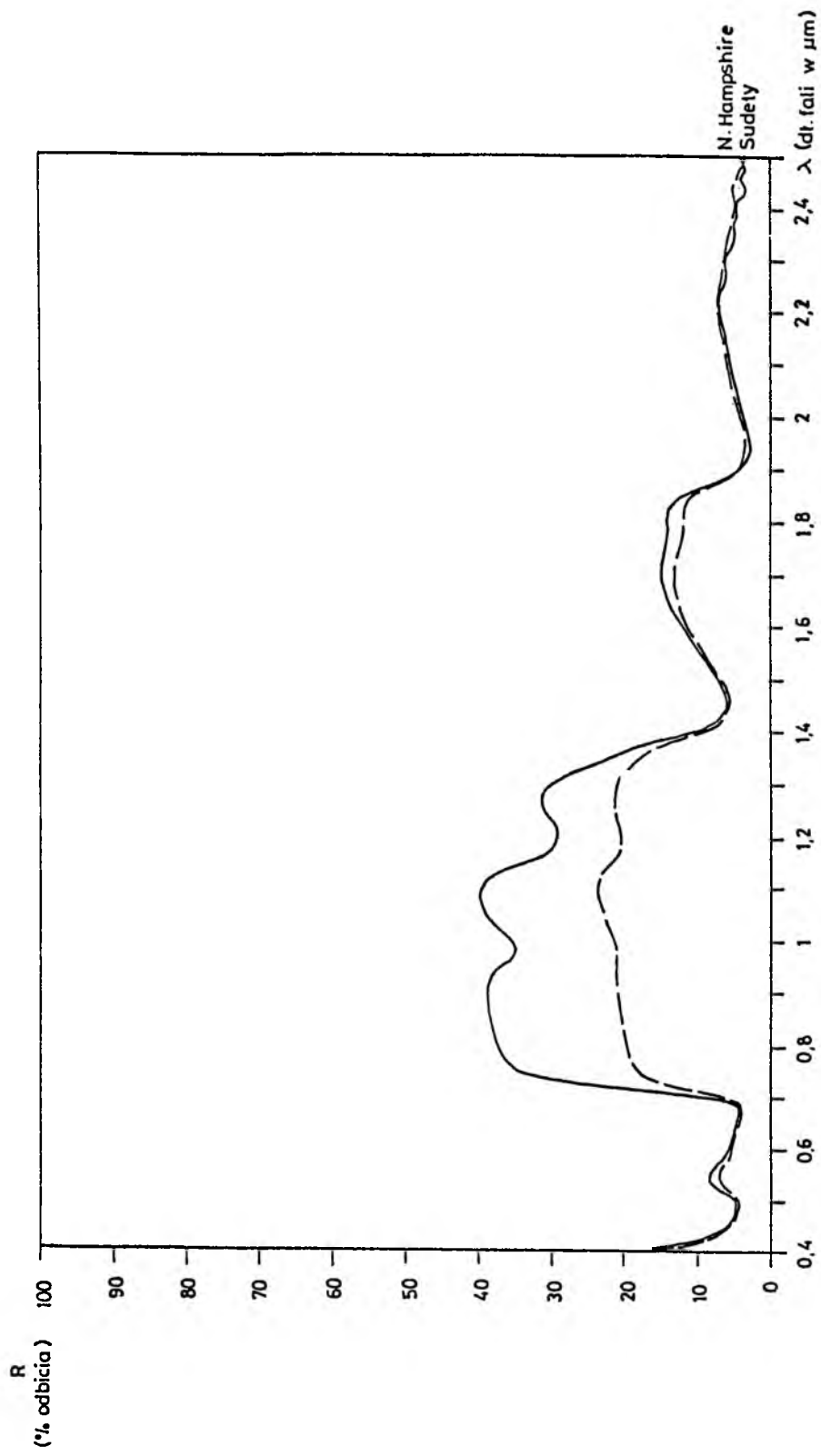
Wysokość nad poziomem morza była określona w 1990 r. na podstawie map topograficznych i pomiarów altimetrem, a w 1991 r. - dodatkowo przeprowadzonych pomiarów za pomocą GPS (Global Positioning System).

Opracowanie wyników pomiarów obejmowało wykreślenie krzywych odbicia spektralnego w zakresie 0.4-2.5µm oraz krzywych ich pierwszej pochodnej w zakresie 0.5-0.8 µm. Miało to na celu zobrazowanie przebiegu krzywych,

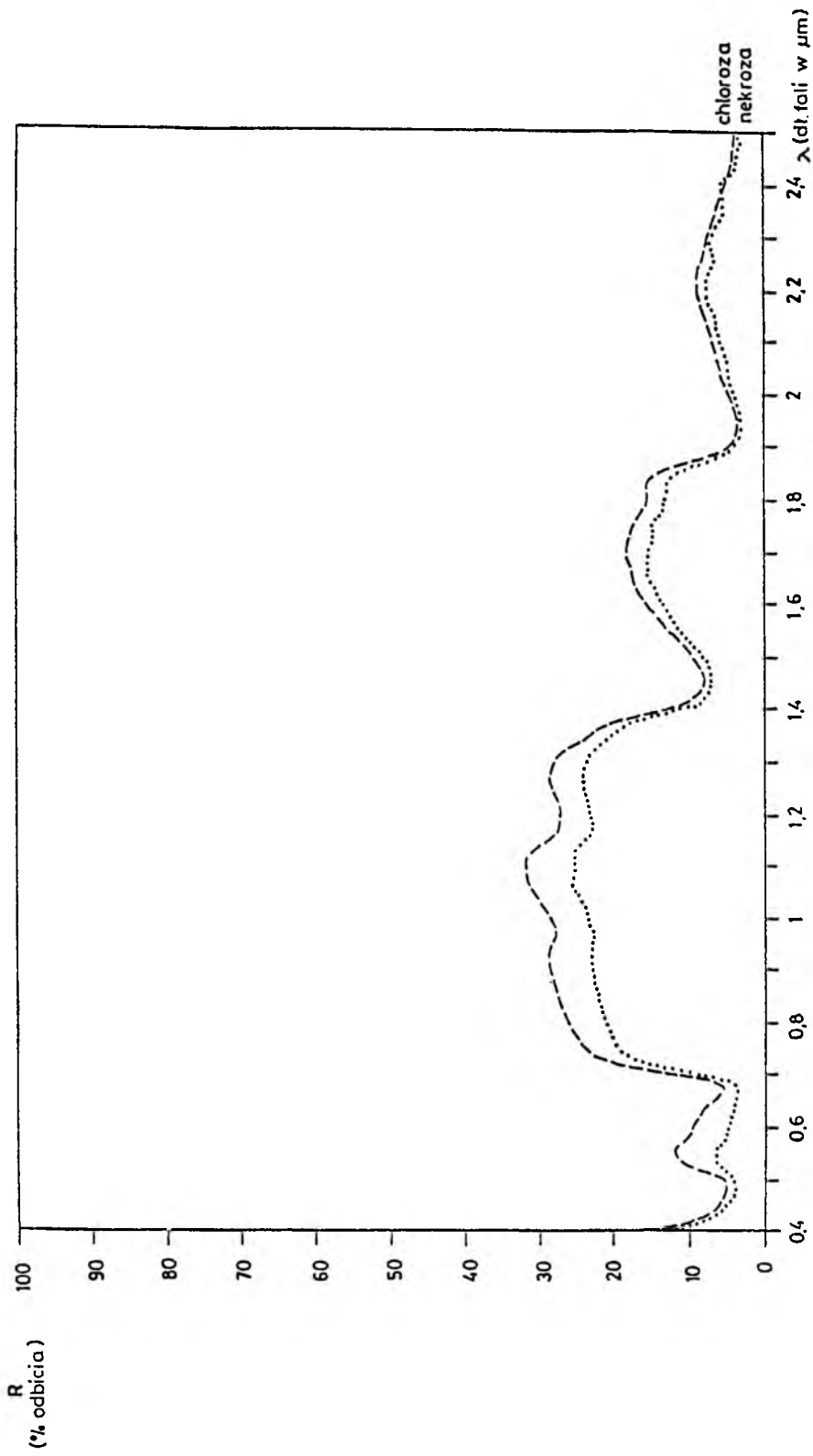
szczególnie w zakresie promieniowania czerwonego (zawartość chlorofilu) i bliskiej podczerwieni (gdzie zaznacza się deficyt wody). Wykonano także wagowanie informacji pozyskanych w zakresach widma odpowiadających kanałom 4 i 3 oraz 5 i 4 skanera TM umieszczonego na satelicie Landsat. Iloraz informacji pozyskanych w kanałach 4 i 3 oraz 5 i 4 jest wskaźnikiem biomasy, w kanałach 5 i 4 zaś - wskaźnikiem uszkodzeń roślinności. Na rys. 1 przedstawiono krzywą odbicia promieniowania elektromagnetycznego od igieł pobranych w New Hampshire, której przebieg jest typowy dla zdrowych roślin (linia ciągła). Zestawiono z nią krzywą spektralną igieł pobranych ze świerków, rosnących na wysokości 950 m n.p.m. W zakresie widzialnym przebieg tych krzywych jest podobny, zarówno w przypadku maksimum odbicia promieniowania zielonego (ok. $0.55 \mu\text{m}$), jak i minimum przypadającym na zakres fal czerwonych (ok. $0.675 \mu\text{m}$), powodowanym pochłanianiem promieniowania o tej długości przez chlorofil. Natomiast w przedziale podczerwieni fotograficznej obserwuje się niespodziewanie niskie odbicie (o ok. 20% niższe niż w przypadku igieł zdrowych), co może świadczyć o poważnym uszkodzeniu igieł na poziomie komórkowym.

Wykresy przedstawione na rys. 2 charakteryzują promieniowanie elektromagnetyczne odbijane od igieł pobranych na wysokości 1100 m n.p.m (linia przerywana) i 1400 m n.p.m (linia kropkowana). Pierwsza krzywa jest typowa dla symptomów chlorozy. W porównaniu do igieł zdrowych obserwuje się wyższe maksimum w zakresie zieleni (wzrost z ok. 8% do ok. 12%) i czerwieni. Ponadto pojawiły się wyraźne "garby" w okolicach fal o długości $0.6 \mu\text{m}$ (związane ze zmniejszonym pochłanianiem przez chlorofil) oraz zwężenie minimum w zakresie promieniowania czerwonego. Natomiast krzywa kropkowana, obrazująca odbicie widma od igieł pobranych z drzewek na wysokości 1400 m n.p.m, charakteryzuje zmiany typu nekrotycznego.

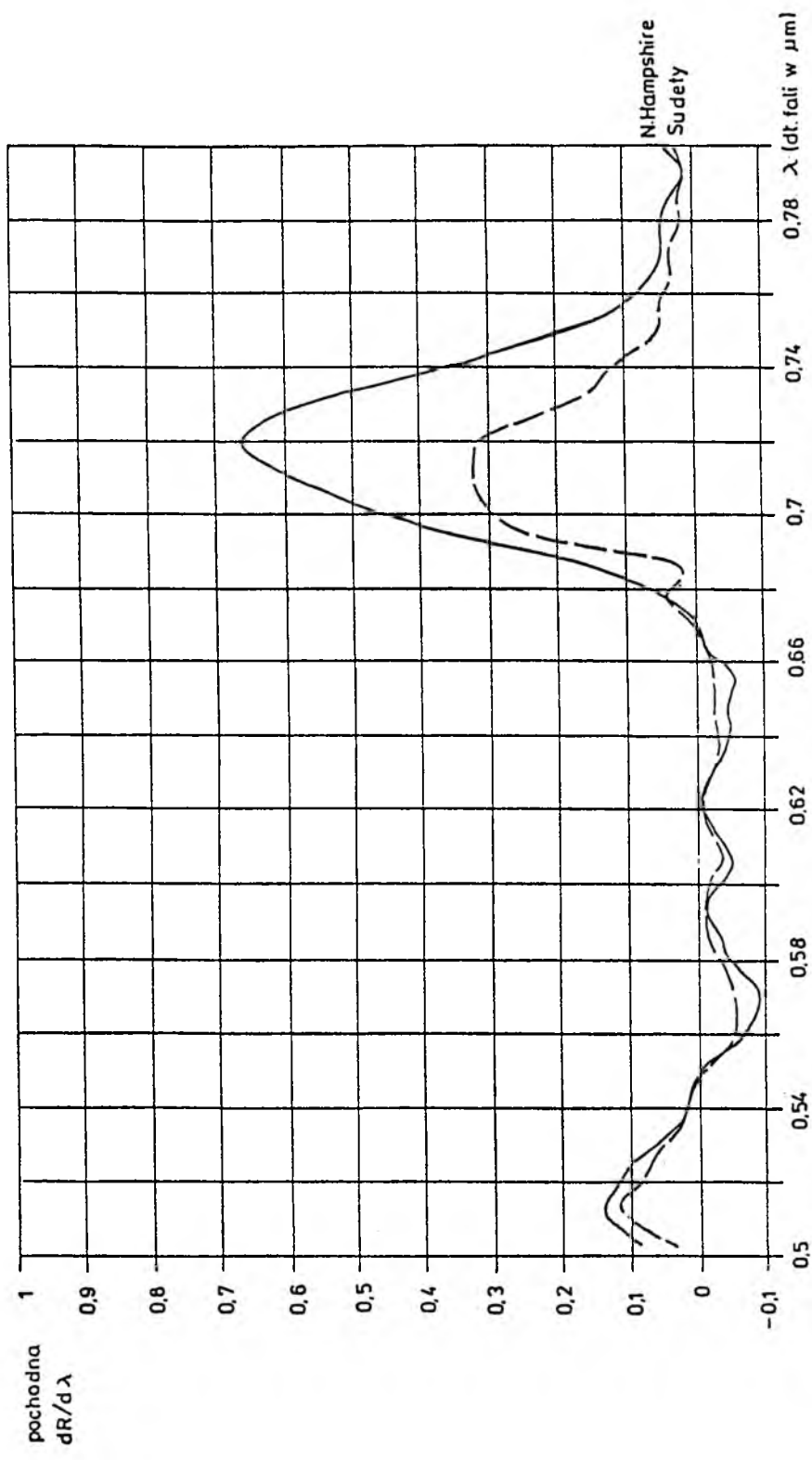
Kolejne wykresy przedstawiają dane przetworzone, w postaci pierwszej pochodnej dla najważniejszego - z punktu widzenia zmian kondycji roślin - zakresu, tzn. $0.5\text{-}0.8 \mu\text{m}$ (zieleń, czerwień i podczerwień fotograficzna). Wykres pierwszej pochodnej uwypukla zmiany przebiegu krzywej. W przypadku igieł pobranych w New Hampshire (linia ciągła na rys. 3) obserwuje się krzywą z progiem w zakresie ok. $0.51 \mu\text{m}$ (maksimum w zakresie zieleni), przegięciem w zakresie ok. $0.67 \mu\text{m}$ (minimum chlorofilowe) oraz maksimum w zakresie $0.72 \mu\text{m}$. Jest to typowy obraz zdrowych roślin (szczególnie maksimum, które w przypadku zdrowych igieł powinno się mieścić w zakresie $0.720\text{-}0.725 \mu\text{m}$). Przebieg krzywej obrazującej odbicie promieniowania od najzdrowszych drzew w Sudetach (linia przerywana na rys. 3) odbiega od powyższej: obserwujemy nie tylko obniżenie wartości odbicia, ale także osobliwe minimum w zakresie $0.685 \mu\text{m}$ oraz szeroki i przesunięty szczyt obrazujący maksimum odbicia w przedziale $0.705\text{-}0.720 \mu\text{m}$.



Rys. 1. Krzywe spektralne zdrowych igieł świerkowych pobranych w New Hampshire (linia ciągła) i igieł świerkowych zebranych z drzew o najlepszej kondycji w Nadleśnictwie Szklarska Poręba (linia przerywana)



Rys. 2. Krzywe spektralne igieł świerkowych z objawami nekrozy (linia kropkowa) i chlorozy (linia przerywana) zebranych w Nadleśnictwie Szklarska Poręba (linia przerywana)



Rys. 3. Wykres I pochodnej krzywych spektralnych igieł świerkowych zebranych w New Hampshire (linia ciągła) i igieł świerkowych zebranych z drzew o najlepszej kondycji w Nadleśnictwie Szklarska Poręba

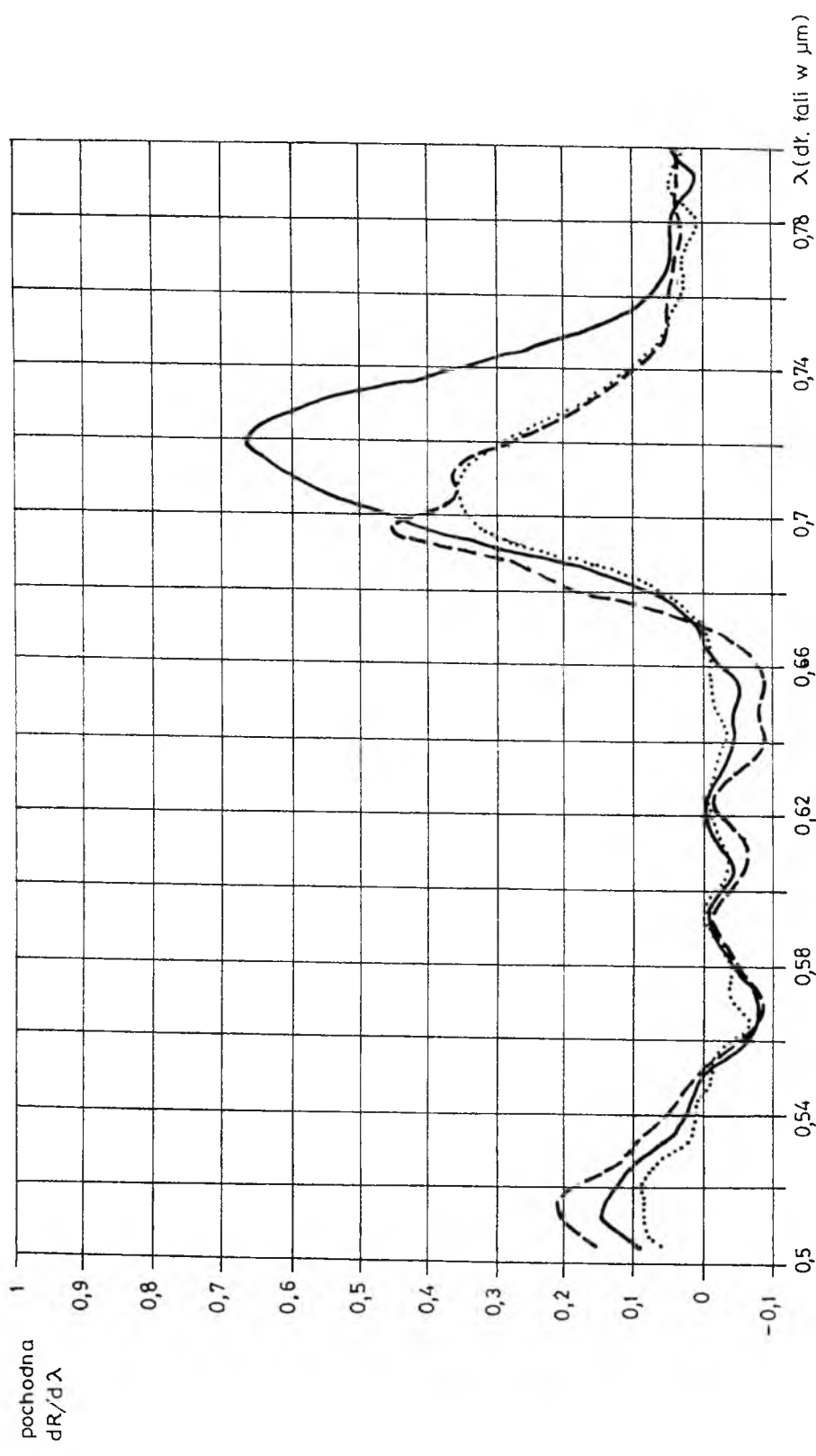
Porównanie przebiegu krzywych odbicia promieniowania elektromagnetycznego przez zdrowe igły (linia ciągła na rys.4), a także przez igły z objawami chlorozy oraz nekrozy (odpowiednio linia przerywana i kropkowana na rys. 4) wykazuje wyraźne różnice. Na wykresie ilustrującym zmiany nekrotyczne, istnieje przesunięcie - w stosunku do wykresu dla igieł zdrowych - w czerwieni (o ok. $0.12 \mu\text{m}$) i zieleni, przy normalnym minimum chlorofilowym. Natomiast krzywa spektralna igieł pobranych na wysokości 1100 m npm wykazuje - w porównaniu do wykresu dla igieł zdrowych - przesunięcie maksimum wykresu o ok. $0.25 \mu\text{m}$, co jest typowym objawem chlorozy.

Wyniki pomiarów wykonanych w 1991 r. potwierdzają rezultaty osiągnięte podczas pomiarów z 1990 r. Jak wynika z rys. 5 na niższych stanowiskach igły pierwszego rocznika mają odbicie spektralne zbliżone do charakterystyk drzew zdrowych, podczas gdy igły tego samego rocznika pobrane z drzew rosnących wyżej wykazują uszkodzenia (niższe odbicie w zakresie zielonym i bliskiej podczerwieni). Bardzo niskie odbicie charakteryzuje igły wszystkich roczników, pobranych z drzew na wysokości 900-1000 m npm. Świadczy to o uszkodzeniach igieł na poziomie komórkowym oraz o objawach suszy fizjologicznej.

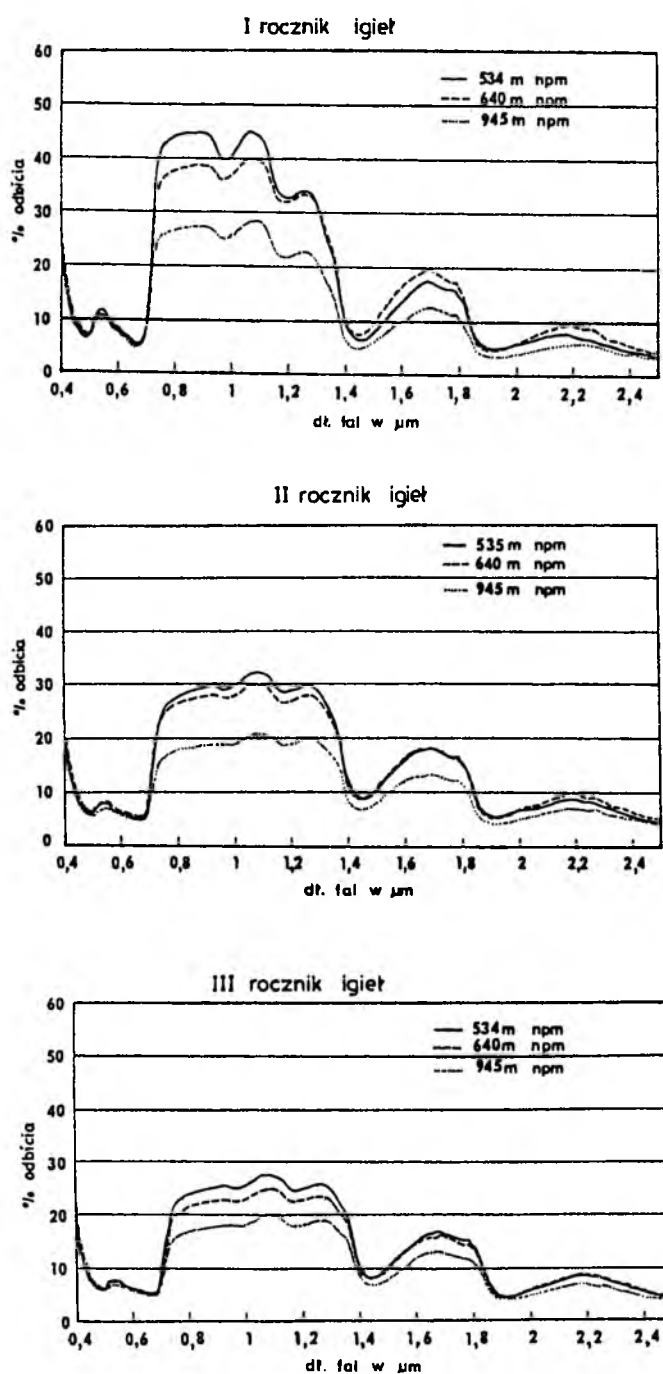
Także wagowanie danych widmowych, otrzymanych podczas pomiarów spektrometrem VIRIS w zakresach odpowiadających kanałom 5 i 4 skanera TM (wskaźnik uszkodzeń) oraz kanałom 4 i 3 (wskaźnik biomasy) wykazało wzrost uszkodzeń wraz z wysokością npm i z wiekiem igieł (rys. 6). Na wszystkich badanych stanowiskach, nawet na najniższej położonych, wartość waganego wskaźnika biomasy wykazuje jej spadek wraz z wiekiem pędów. Wraz ze wzrostem wysokości npm nawet jednoroczne pędy wykazują spadek biomasy, co świadczy o silnym stresie roślin, powodowanym suszą i uszkodzeniem komórkowym. Wraz ze wzrostem wieku igieł oraz wysokości nad poziom morza także obserwuje się spadek wartości tego wskaźnika.

Związek różnych objawów stresu z wagowaniem odpowiedzi spektralnych roślin w zakresach średniej i bliskiej podczerwieni, odpowiadających kanałom TM 5/4, wykazuje, że przy wartości wskaźnika ok. 0.5 występuje ubytek wody w liściach, podczas gdy wartość wskaźnika 0.7 jest typowa dla zamierania aparatu asymilacyjnego (Rock i in., 1992). Wyniki pomiarów przeprowadzonych w Sudetach w 1991 r, wykazują (rys. 6), że na najniższym badanym stanowisku (534 m npm) pierwszoroczne igły, a więc najzdrowsze, charakteryzowały się wskaźnikiem 0.34, drugoroczne - 0.59, a trzyletnie - 0.65. Natomiast w przypadku drzew na wysokości 945 m npm otrzymano wartości odpowiednio 0.42, 0.7 i 0.7.

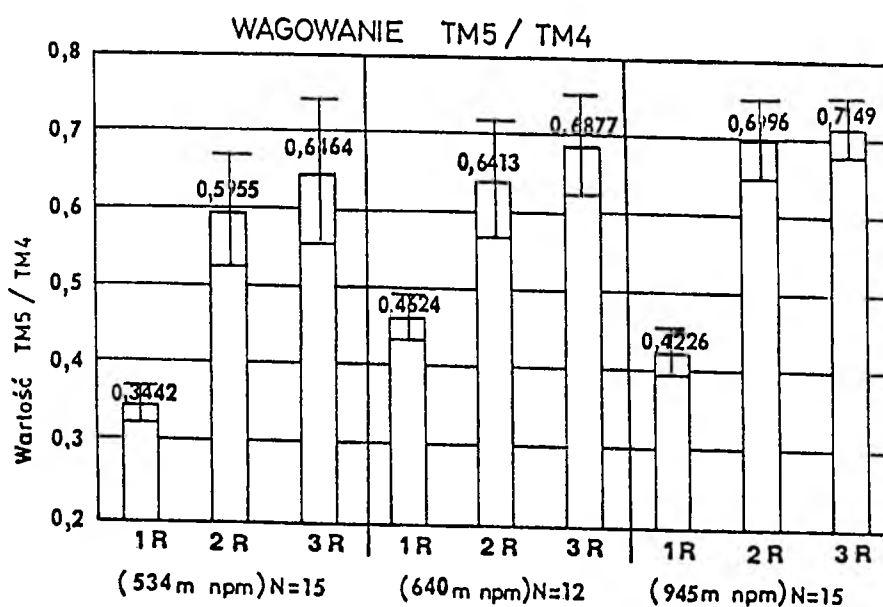
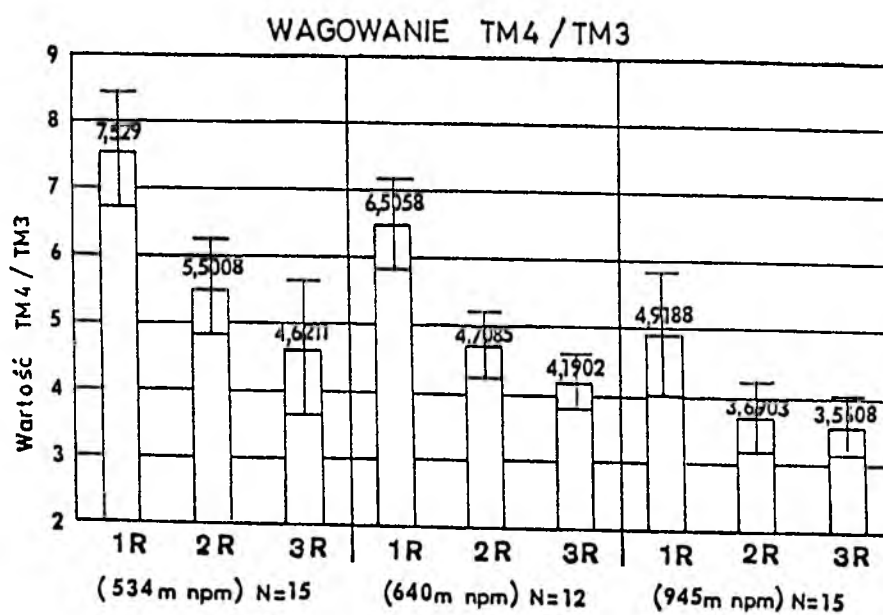
Kolejnym potwierdzeniem wysokiego stopnia uszkodzeń świerków w Sudetach jest przesunięcie punktów przegięcia czerwonej krawędzi na wykresie pierwszej pochodnej, otrzymanej z krzywej odbicia spektralnego analizowanych igieł. Wartość punktów przegięcia czerwonej krawędzi jest silnie skorelowana z koncentracją chlorofilu (Horler i in., 1983; Moss i Rock, 1991; Rock i in.,



Rys. 4. Wykres I pochodnej krzywych spektralnych igieł pobranych z sudeckich świerków z objawami nekrozy (linia kropkowana) i chlorozy (linia przerywana) oraz ze świerków z New Hampshire (linia ciągła).



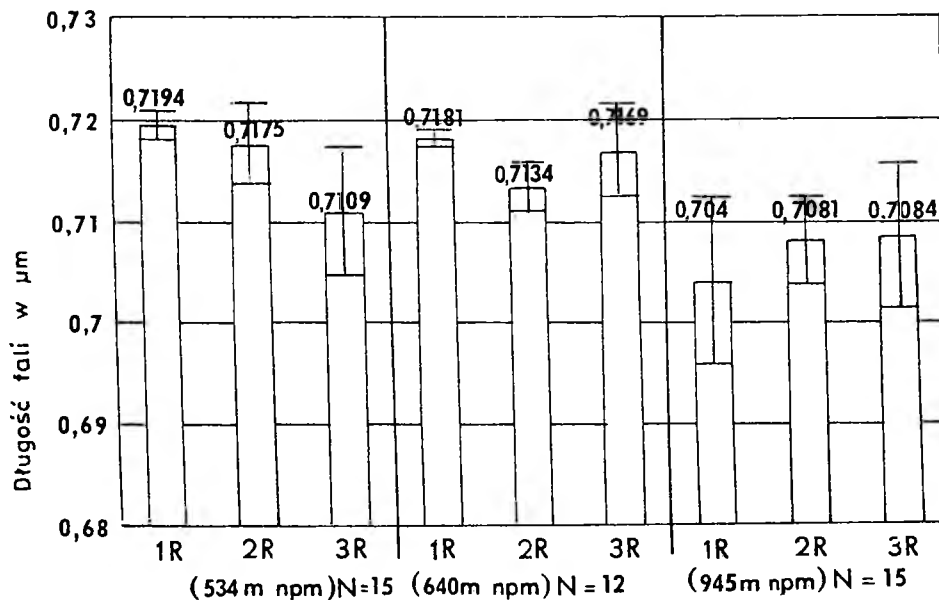
Rys. 5. Odbicie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 0,4-2,5 μm od igieł świerkowych zebranych w Sudetach w 1991 r.



Rys. 6. Wyniki wagowań odpowiedzi spektralnych igieł świerkowych, odpowiadającym zakresom TM 4/3 (wskaźnik biomasy) i 5/4 (wskaźnik uszkodzeń)

1988) i w przypadku zmniejszenia się jego zawartości w igłach, maksimum odbicia promieniowania czerwonego przesuwają się ku niższym długościom fal. Przesunięcie to w przypadku początkowych uszkodzeń drzew wynosi 5-10 nm, a igły z oznakami silnej chlorozy charakteryzują się przesunięciem maksimum o 15-20 nm (Rock i in., 1986, 1988). Rysunek 7 przedstawia wartości promieniowania elektromagnetycznego odpowiadające maksimum odbicia w zakresie czerwieni, jakie wykazują próbki pobrane w Sudetach w 1991 r. Wykresy te wskazują na dramatyczny spadek chlorofilu w igłach wraz z wiekiem igieł oraz wysokością npm. Żadna z analizowanych próbek nie wykazywała wartości maksimum, właściwego dla zdrowych drzew. Nawet wykresy dla pierwszorocznych igieł pobranych z drzew na najniższych stanowiskach charakteryzują się przesunięciem punktów przegięcia czerwonej krawędzi.

Wszystkie przytoczone wyniki analiz wykazują bardzo słabą kondycję sudeckich świerków. Wyniki te posłużyły jako dane referencyjne do analiz zdjęć lotniczych i satelitarnych, bazujących na rejestracji odbicia promieniowania elektromagnetycznego od obiektów na powierzchni Ziemi. Poznanie zmienności odbicia spektralnego drzew na obszarze Sudetów było więc niezwykle pomocne w interpretacji i klasyfikacji danych teledetekcyjnych.



Rys. 7. Wartości punktów przegięcia czerwonej krawędzi, na wykresie I pochodnej, dla igieł zebranych w 1991 r.

4.4. LAI-wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści

Leaf Area Index - LAI, czyli powierzchnia projekcyjna liści odniesiona do jednostki powierzchni (m^2/m^2), jest istotnym parametrem charakteryzującym fotosyntezę i ewapotranspirację oraz pozwalającym ocenić kondycję roślin. Możliwość określenia LAI za pomocą technik teledetekcyjnych pozwoliłaby na szybką ocenę kondycji (fotosyntezy, transpiracji) drzewostanów na znacznych obszarach.

Radiacja lasów iglastych, mierzona w zakresie czerwonym promieniowaniu elektromagnetycznego, jest zależna od wskaźnika powierzchni projekcyjnej liści (Spanner i in. 1990). Można więc wyciągnąć wniosek, że właściwości widmowe drzewostanów, rejestrowane przez skaner Thematic Mapper, powinny pozostawać w związku z LAI. W celu zweryfikowania tej tezy podjęto działania zmierzające do określenia LAI wybranych drzewostanów świerkowych na poligonie badawczym założonym w Sudetach.

Bezpośrednie pomiary powierzchni igieł podczas badań opisywanych w niniejszej pracy były niemożliwe. Postanowiono zatem wykorzystać metodę określenia zasobności aparatu asymilacyjnego na podstawie porównania radiacji na poziomie koron oraz dochodzącej do dna lasu. Na takim porównaniu bazuje pomiar LAI urządzeniem LAI-2000 firmy LI-COR.

Wiązka promieniowania słonecznego, przechodząca w głąb szaty roślinnej, zostaje częściowo zatrzymana przez poszczególne elementy roślin. Prawdopodobieństwo intercepcji zależy od długości toru wiązki światła oraz gęstości i kąta nachylenia liści. Gdy liście są ułożone prostopadle do kierunku padania wiązki promieniowania, szansa na jej zatrzymanie jest większa niż przy ułożeniu równoległym. Pomiar promieniowania słonecznego przechodzącego w głąb lasu jest oparty na pomiarach wielkości redukcji niebosłonu (*gap fraction*), czyli nie zasłoniętej przez rośliny części "nieba" - wielkości analogicznej do współczynnika przepuszczania światła. Spośród wielu przyrządów służących do wykonywania takich pomiarów (np. Captometer, DEMON, LI-191, Pasture Probe) LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, produkowany przez amerykańską firmę LI-COR, jest uznawany za najdokładniejszy i najszybszy.

Przyrząd ten składa się z czujnika optycznego i logera (mikrokomputerowy rejestrator danych), którego oprogramowanie pozwala na wykonywanie obliczeń. Czujnik zbudowany jest z kilku soczewek, filtra i detektora promieniowania, który składa się z pięciu fotodiod połączonych koncentrycznie. Soczewki, znajdujące się przed detektorem, kierują na każdy pierścień promieniowanie, padające pod innym kątem (7, 23, 38, 53 i 68°), natomiast specjalny filtr zatrzymuje promieniowanie o zakresie powyżej 490 nm. W ten sposób udział promieniowania odbitego od liści lub przenikającego przez liście został ograniczony do ok. 2%.

Pomiar wykonywany tym instrumentem składa się z kilkunastu odczytów. Pierwszy (referencyjny) określa wartość promieniowania poza lasem, a kolejne - w drzewostanie. Na podstawie tych odczytów oblicza się wartości redukcji nieboskłonu. Oprogramowanie zainstalowane w logerze pozwala na natychmiastowe odczytanie wartości wskaźnika powierzchni projekcyjnej liści (LAI - Leaf Area Index) oraz wartości średniego kąta pochylenia liści (MTA - Mean Tip Angle), a także ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi (w procentach powierzchni półsferycznego pola widzenia czujnika optycznego).

Pomiary instrumentem LAI-2000 wykonuje się w warunkach całkowitego zachmurzenia nieba lub przy położeniu słońca blisko horyzontu. W ten sposób eliminuje się udział promieniowania rozproszonego docierającego w głąb szaty roślinnej, co przy silnym nasłonecznieniu mogłoby zaniżyć wyniki. Wszystkie odczyty zapisywane są w pamięci operacyjnej logera. Po wykonaniu ostatniego z nich i obliczeniu pożądanych parametrów powstały zbiór danych jest zapisywany w postaci pliku w pamięci głównej. Zawartość plików może być wywoływana i przeglądana na wyświetlaczu logera lub skopiowana do komputera typu IBM PC. Opisany instrument posłużył do wykonania pomiarów w drzewostanach świerkowych Sudetów Zachodnich (Zawiła-Niedźwiecki i in., 1993).

W pierwszym etapie analiz dotyczących powierzchni projekcyjnej liści badano zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI i MTA, a wskaźnikami defoliacji (Df) i kondycji (Dm) lasu. Wyniki tych analiz pokazują, że defoliacja znajduje się w silnym związku z LAI i MTA, a Df i Dm są także silnie związane z samym MTA (współczynniki korelacji dochodzą do 0.98). Wysoka wartość współczynników korelacji LAI i MTA z defoliacją i uszkodzeniami świadczą o przydatności tych wskaźników do oceny kondycji lasów świerkowych. Zwraca uwagę duża zależność pomiędzy kondycją drzew a przestrzennym ustawieniem igieł. Wskaźnik ten (MTA) nie jest stosowany w opisach drzewostanu, gdyż wizualna jego ocena jest praktycznie niemożliwa. Jednakże zastosowanie specjalistycznych urządzeń mierzących charakterystyki spektralne pozwala na wprowadzenie nowych parametrów oceny stanu lasu.

Po stwierdzeniu, że kondycja drzew może być opisywana wskaźnikiem LAI, podjęto próbę oceny, który z terenowych parametrów (Dm, Df) lepiej oddaje stan lasu. Dokonano tego poprzez budowę (w systemie STATGRAPHICS) formuły, w której zmienną zależną był LAI, a zmiennymi niezależnymi - Df i Dm. Podczas obliczeń system wyeliminował zmienną Df, uznając że nie wnosi ona nowych danych w odniesieniu do zmiennej Dm. Wydaje się to logiczne, gdyż wskaźnik Dm obliczany jest na podstawie oceny defoliacji, zahamowania przyrostu i żywotności drzew, a więc agreguje w sobie informacje o ubytku aparatu asymilacyjnego.

Kolejnym krokiem, po stwierdzeniu zależności pomiędzy wskaźnikiem LAI a terenowymi parametrami kondycji lasu, było określenie zależności pomiędzy LAI, a charakterystykami spektralnymi drzewostanów, określonymi na podstawie zdjęć satelitarnych TM. Dokonywano tego zarówno w odniesieniu do nowych zdjęć, jak i zdjęć po korekcji radiometrycznej, a także dla kanałów sztucznie utworzonych (TM 4/3, TM 5/4, wskaźnika roślinności-NDVI, wskaźnika jasności-BR i składowych głównych-PC). Stwierdzono, że zarówno dane pierwotne, jak i po korekcji radiometrycznej są związane ze wskaźnikiem LAI, jednakże nie wszystkie zakresy spektralne TM oddają wiernie wielkość LAI. Najwyższe korelacje stwierdzono dla TM1 oraz TM2, TM3, TM4. W przypadku regresji wielu zmiennych osiągnięto $R_a^2=0.94$, stosując formuły $LAI = f(TM3, TM5, TM7)$ i $R_a^2=0.93$ w przypadku formuły $LAI = f(TM5, TM7)$. Wynika z tego, że stosując korelację wielu zmiennych, dobre wyniki można osiągnąć, wykorzystując jedynie zakresy podczerwieni średniej. Stwierdzono więc związek LAI z charakterystykami spektralnymi drzewostanów zarejestrowanymi na zdjęciach TM. Z przeprowadzonych analiz wynika ponadto, że korekcja radiometryczna nie wpływa znacząco na poprawę wyników.

Analizę związków LAI ze składowymi głównymi, obliczonymi ze zdjęć wykonanych skanerem TM, przeprowadzono dla wszystkich siedmiu zakresów oraz osobno dla sześciu zakresów, po eliminacji kanału 6 - podczerwieni termalnej. Uprzednio dokonane obliczenia wykazały, że zakres ten nie wnosi istotnych informacji o LAI i może być pominięty w szczegółowych analizach. Stwierdzono natomiast silne związki LAI z PC2 i PC3, a także NDVI, BR i wagowaniem TM 4/3 (współczynniki korelacji rzędu 0.93-0.94). Zwraca uwagę porównywalna wielkość współczynnika korelacji dla składowych głównych, obliczonych dla sześciu i dla siedmiu zakresów TM. Potwierdza to poprzednie spostrzeżenie, że kanał TM6 nie wnosi nowych informacji dotyczących LAI. Zaskakujący jest natomiast brak wyraźnej zależności z PC1, w którym to kanale zawarta jest największa (ok. 90%) ilość informacji o środowisku. Może to świadczyć o tym, że to kanały PC2 i PC3 przenoszą najwięcej informacji o stanie aparatu asymilacyjnego, mimo że zawierają zaledwie 10% informacji o środowisku, rejestrowanych przez skaner satelity.

Przeprowadzone analizy wykazały istnienie związków pomiędzy kanałami wagowanymi a LAI i MTA. W przypadku wagowań TM 4/3, TM 5/4, NDVI i BR jest to logiczna konsekwencja faktu, że wagowania te stosuje się do opisywania tych samych elementów, które charakteryzują wskaźniki LAI i MTA, a jedynie sposób dochodzenia do tych wartości jest odmienny. Należy podkreślić, że włączenie do modeli MTA wyraźnie zwiększa wartość współczynników korelacji, a w przypadku składowych głównych zanotowano silny związek typu $PC=f(MTA)$.

Rekapitulując wyniki analiz dotyczących powierzchni projekcyjnej liści, należy stwierdzić, że jest to wskaźnik dobrze oddający kondycję lasu oraz silnie związany z odpowiedziami spektralnymi rejestrowanymi przez skaner TM. Szczególnie zakresy widzialne i kanały wagowane wykazują istotny związek z LAI. Może on być zatem wykorzystywany do określania kondycji lasów odwzorowanych na zdjęciach satelitarnych, wykonanych skanerem TM.

5. ANALIZA ZDJĘĆ SATELITARNYCH SUDETÓW ZACHODNICH

5.1. Przetwarzanie zdjęć satelitarnych wykonanych w zapisie numerycznym

Podczas interpretacji zdjęć satelitarnych obszaru Sudetów Zachodnich wykorzystywano różne systemy przetwarzania obrazów, umożliwiające odtwarzanie, wizualizację i klasyfikację zdjęć. Zastosowanie poszczególnych operacji przetwarzania obrazowego (rys. 8) dotyczyło:

- odtwarzania zdjęcia,
- poprawiania obrazu,
- geometrii zdjęcia,
- analizy treści (klasyfikacji),
- operacji poklasyfikacyjnych.

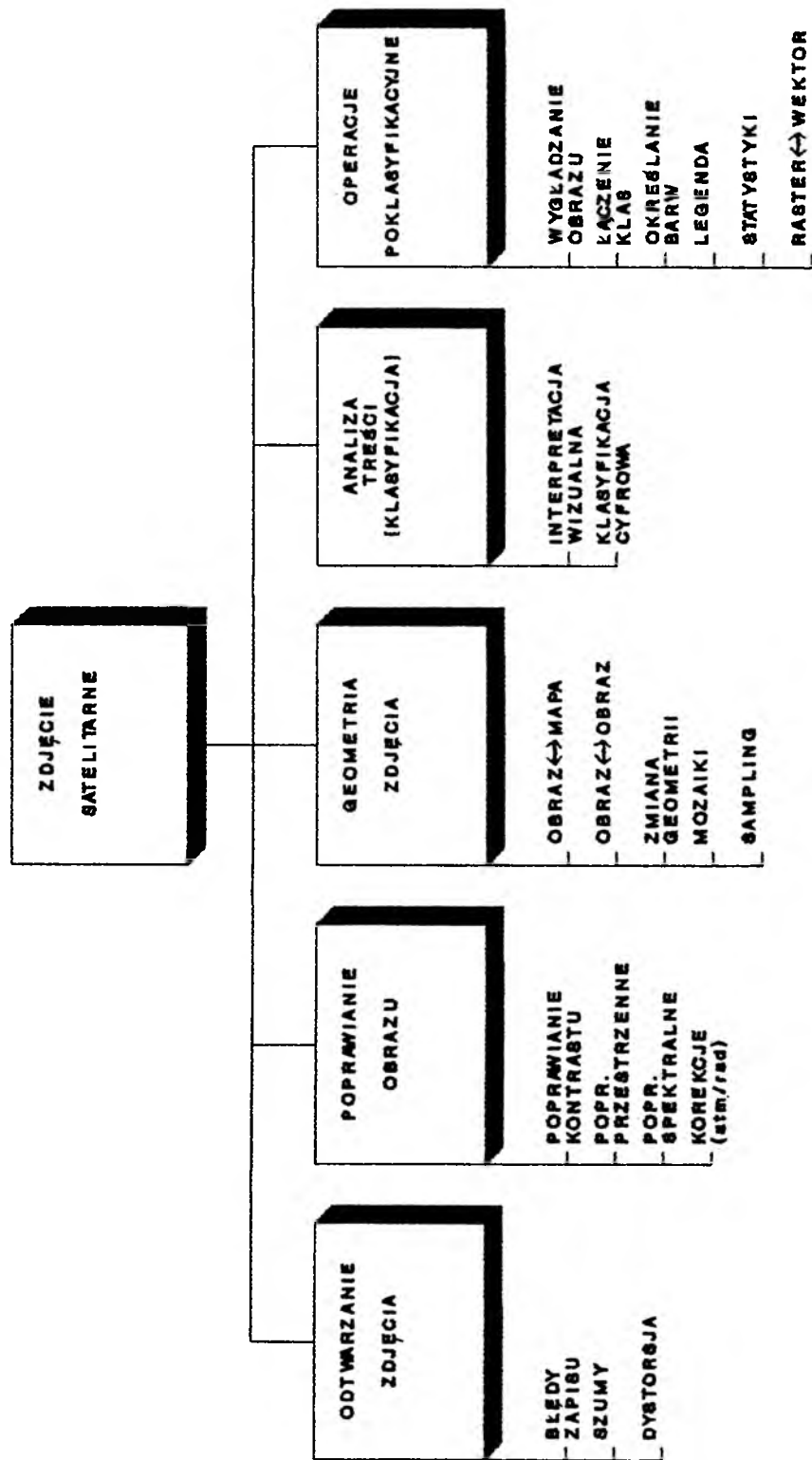
Wszystkie te operacje, z których większość wykonywana jest techniką cyfrową, służyły wydobyciu ze zdjęcia satelitarnego maksimum treści.

5.1.1. Odtwarzanie zdjęcia

Odtwarzanie zdjęcia polega na usunięciu zakłóceń spowodowanych błędami zapisu (skanowania) lub wadliwym działaniem skanera oraz na usunięciu zniekształceń, które mogą utrudniać przestrzenną lokalizację obiektów odwzorowanych na zdjęciu.

Najczęściej spotykanymi błędami zapisu skanera są: brakujące linie, piksele lub ich grupy, przypadkowa obecność fragmentu innego obrazu lub zniekształcenie wartości spektralnych na części obrazu.

Gdy błędy zapisu i zniekształcenia są widoczne, to ich eliminacja lub ograniczenie wpływu na wynik końcowej klasyfikacji są stosunkowo proste. Zbędne linie (lub piksele) eliminowano z obrazu, a na miejsce brakujących wprowadzano linie, których poszczególne piksele miały wartości, obliczone z zastosowaniem odpowiednich filtrów (np. 2x2 lub 3x3 piksele), jako średnie z wartości pikseli sąsiednich.



Rys. 8. Schemat przetwarzania numerycznych zdjęć satelitarnych

Dosyć dużym utrudnieniem jest dystorsja zdjęcia. Podczas jego rektyfikacji zwracano uwagę, aby nie zniekształcić charakterystyk spektralnych poszczególnych obiektów, co mogłoby wpłynąć na zmniejszenie dokładności wszelkich analiz dokonywanych na podstawie takiego zmienionego zdjęcia.

5.1.2. Poprawianie obrazu

W operacji poprawiania obrazu można wyodrębnić cztery fazy poszczególnych czynności (rys. 9):

- zwiększanie kontrastu,
- poprawianie przestrzenne,
- poprawianie spektralne,
- korekcja obrazu.

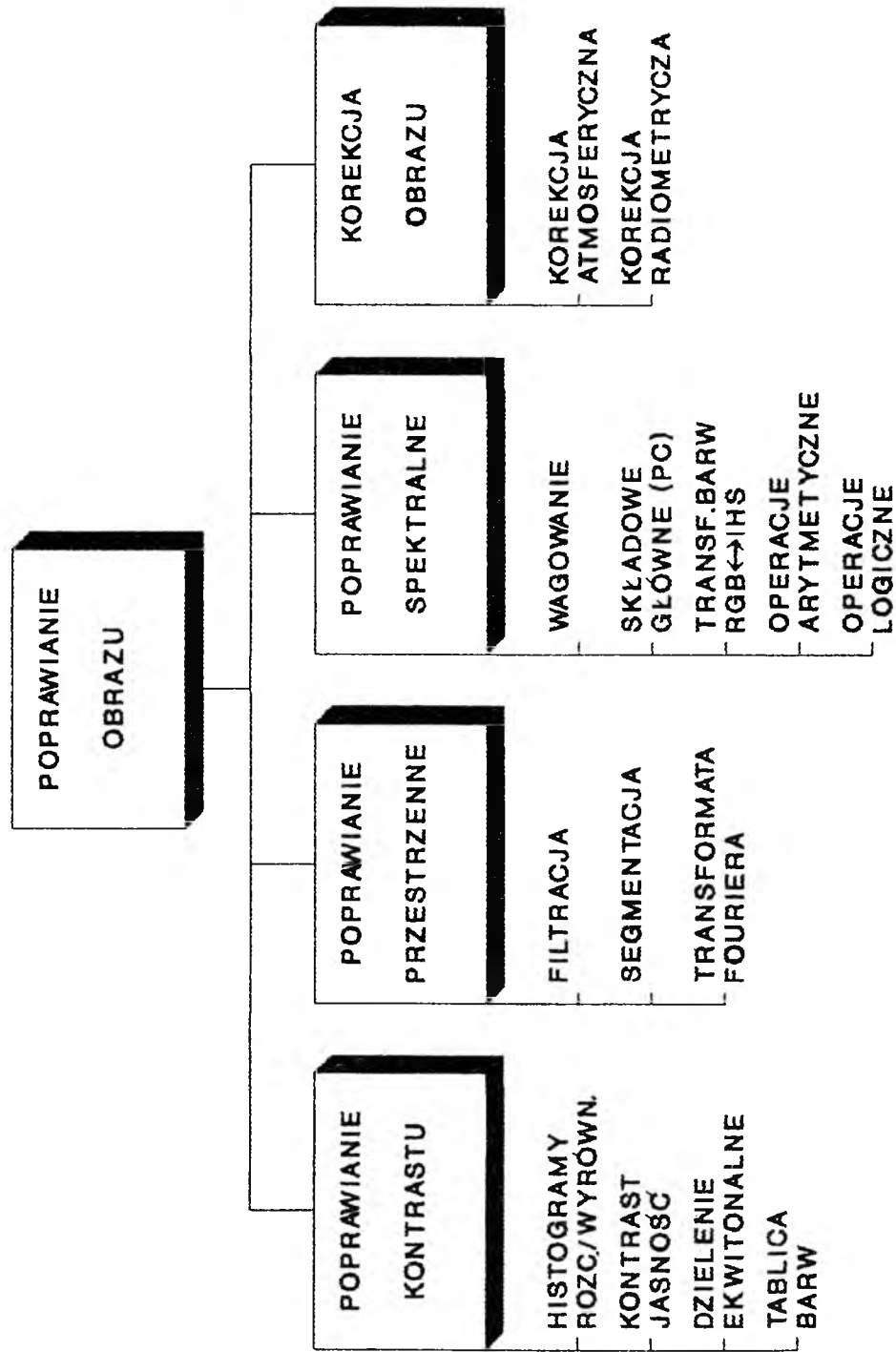
Zwiększenie kontrastu zdjęcia jest związane z analizą histogramów częstości występowania pikseli o określonych wartościach spektralnych w 256 stopniowej skali tonów szarości. Na poszczególnych wyciągach spektralnych zdjęć satelitarnych obraz jest zarejestrowany w stosunkowo wąskich zakresach tonów szarości. Jedną z podstawowych funkcji poprawiania kontrastu jest rozciągnięcie zakresu występowania pikseli na cały, 256-tonalny zakres skali. Operacja ta powoduje, że z pierwotnie ciemnego obrazu, na którym można dostrzec tylko niewielką ilość szczegółów, otrzymuje się obraz o wyraźnym zróżnicowaniu tonalnym poszczególnych obiektów terenowych.

W przypadku analizy zdjęcia wykonanego w jednym tylko zakresie spektralnym (np. SPOT XP), w celu łatwiejszego rozpoznawania szczegółów terenowych, można stosować ekwitalne dzielenie obrazu. Polega ono na podzieleniu zakresu spektralnego, zarejestrowanego na zdjęciu na przedziały, którym można przyporządkować poszczególne barwy zdefiniowane w tablicy barw. Przedziały te mogą być rozłożone równomiernie, dzieląc 256 tonalny obraz na równe przedziały lub na przedziały zdefiniowane przez użytkownika.

Wynik takiej operacji ma postać zbliżoną do wyniku klasyfikacji nienadzorowanej, a poszczególnym wyróżnionym klasom nadaje się odpowiednie definicje opisujące stan terenowy.

Z kolei w zakresie poprawiania przestrzennego wykonuje się operacje zmieniające przestrzenną strukturę obrazu, poprzez jego filtracje, segmentacje lub transformację Fouriera.

Filtracje mają na celu "wygładzenie" lub podkreślenie krawędzi obiektów zarejestrowanych na zdjęciu, w celu ułatwienia jego interpretacji. Dokonuje się tego poprzez wzmocnienie poszczególnych zakresów częstości przestrzennych (filtry górnoprzepustowe filtrujące wysokie częstości przestrzenne lub dolnoprzepustowe wzmocniające niskie częstości przestrzenne) oraz poprzez uśrednianie i wagowanie pikseli według zdefiniowanego przez interpretatora wzorca (2x2, 3x3, 4x4 piksele).



Rys. 9. Schemat poprawiania obrazu zdjęć satelitarnych

W przypadku zdjęć Thematic Mapper i SPOT, obrazujących tereny leśne, najkorzystniejsze jest stosowanie wysokich częstotliwości przestrzennych, natomiast interpretacja treści leśnej zdjęć ERS-1.SAR najlepiej wypada po zastosowaniu filtracji niskich częstotliwości przestrzennych.

Inną operacją poprawiania przestrzennego obrazu zarejestrowanego na zdjęciu satelitarnym jest tzw. segmentacja. Polega ona na wyróżnianiu na zdjęciu obszarów jednorodnych spektralnie oraz wzmocnieniu granic pomiędzy różnymi obiektami terenowymi zobrazowanymi na zdjęciu. Dokonuje się tego poprzez:

- klasyfikowanie obrazu w oparciu o analizę statystyczną,
- wykrywanie krawędzi,
- stosowanie metody powiększających się obszarów.

Segmentacja poprzez klasyfikacje statystyczne polega na określaniu zasięgu obszarów o podobnym charakterze spektralnym oraz na rozdzieleniu klas zachodzących na siebie. Wykrywanie krawędzi opiera się natomiast na filtracji obrazu, w celu rozpoznania obszarów, na których następuje gwałtowna zmiana wartości tonów szarości poszczególnych pikseli. Z kolei w metodzie powiększających się obszarów ustala się na zdjęciu punkt rozpoczęcia obliczeń i kolejne piksele są sprawdzane w celu stwierdzenia, czy są one dostatecznie bliskie spektralnie aktualnie ocenianemu obszarowi. Jeżeli różnica intensywności dwóch kolejnych (lub grupy) pikseli nie przekracza zdefiniowanej przez interpretatora wartości, to zaliczane są one do jednej klasy, a gdy przekracza tę wartość, zaliczane są do różnych klas. Metoda powiększających się obszarów jest pośrednią pomiędzy klasyfikacjami a wykrywaniem krawędzi i bierze pod uwagę zarówno powinowactwo charakterystyk poszczególnych obiektów, jak i odległości w wielowymiarowej przestrzeni spektralnej.

Transformata Fouriera jest rzadko stosowana w przypadku analiz zdjęć obszarów leśnych. Może tu znaleźć zastosowanie głównie do eliminacji niektórych zakłóceń obrazu, których usunięcie innymi metodami nie jest możliwe. Polega ona na zamianie struktury przestrzennej zdjęcia na strukturę częstościową, poprzez obliczenie amplitudy i fazy dla każdej możliwej częstotliwości przestrzennej obrazu. Po wydzieleniu składowych częstotliwości przestrzennych można wyświetlić ich wartości w dwuwymiarowej postaci tzw. "spektrum Fouriera", w której niskie częstotliwości są zgrupowane w centrum spektrum, a wyższe sukcesywnie na peryferiach. Horyzontalne elementy oryginalnego obrazu są przy tym przedstawiane w płaszczyźnie pionowej, a wertykalne tworzą poziomą składową spektrum Fouriera. Ten typ transformacji obrazu służy usuwaniu szumów i jest stosowany jako dodatek do filtracji przestrzennych. Po dokonaniu ulepszeń w spektrum Fouriera, dokonuje się powrotnej transformacji do obrazu o charakterze przestrzennym.

Kolejna grupa operacji, dotycząca poprawiania spektralnego, związana jest z działaniami nie na pojedynczych obrazach (wyciągach spektralnych), ale na ich

grupach. Wykorzystuje się w tym przypadku relacje pomiędzy odpowiedziami spektralnymi tych samych obiektów, rejestrowanymi przez poszczególne kanały skanera.

Ta grupa operacji na zdjęciach satelitarnych jest niezwykle przydatna przy leśnych zastosowaniach teledetekcji satelitarnej i obejmuje:

- wagowanie poszczególnych zakresów spektralnych,
- obliczanie składowych głównych,
- transformacje barw,
- operacje arytmetyczne,
- operacje logiczne.

Jak wynika z badań przeprowadzonych na obszarze Sudetów, w przypadku wykorzystywania siedmiozakresowych zdjęć Thematic Mapper dla potrzeb leśnictwa należy zalecić stosowanie wagowań kanałów 5 i 4 oraz 4 i 3, a także obliczanie składowych głównych. Powyższe wagowania umożliwiają stratyfikację drzewostanów świerkowych odwzorowanych na zdjęciu oraz pozwalają oceniać drzewostany znajdujące się na różnie oświetlonych stokach. Tworzenie składowych głównych pozwala natomiast na zagregowanie danych z wielu zakresów spektralnych do trzech kanałów głównych.

W przypadku trzyzakresowych zdjęć SPOT nie zachodzi potrzeba eliminacji ilości analizowanych kanałów i dlatego składowe główne nie mają przy interpretacji tych zdjęć zastosowania. Natomiast wagowanie odpowiedzi spektralnych, rejestrowanych w poszczególnych kanałach przez satelitę SPOT, jest przydatne i bywa stosowane w interpretacji tych zdjęć.

Kolejną grupę operacji poprawiania spektralnego stanowi transformata RGB \leftrightarrow IHS (Red-Green-Blue \leftrightarrow Intensity-Hue-Saturation), czyli transformacja obrazu utworzonego jako kompozycja barwna, poprzez naświetlenie wyciągów spektralnych trzech zakresów zdjęcia satelitarnego trzema barwami podstawowymi, na postać, w której operuje się intensywnością, odcieniem i wysyceniem barwy. Po dokonaniu (najczęściej interaktywnie) odpowiednich przetworzeń IHS, zmieniających intensywność, odcień i wysycenie, następuje powrót do postaci obrazu barwnego RGB.

Grupa operacji arytmetycznych i logicznych dotyczy tych wszystkich działań, w ramach których dokonuje się podstawowych działań arytmetycznych oraz logicznych na dwóch lub kilku zdjęciach tego samego obszaru, wykonanych przez tego samego satelitę w różnych porach roku lub też przez różne satelity.

Operacje korekcji obrazu dotyczą:

- eliminacji wpływu atmosfery na wartości spektralne zarejestrowane na zdjęciu satelitarnym (korekcje atmosferyczne), podczas której stosuje się formuły matematyczne opisujące odbicie, przenikanie i pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego przez atmosferę ziemską,
- korekcji wpływu różnej wysokości Słońca podczas rejestracji zdjęć satelitarnych (korekcja radiometryczna), najczęściej stosowane przy porównywaniu i zestawianiu zdjęć wykonanych w różnych terminach.

5.1.3. Geometria zdjęcia

Pojęcie geometryzacji zdjęcia satelitarnego jest stosunkowo szerokie i zawiera w sobie operacje dotyczące:

- wpasowania zdjęcia w mapę,
- wpasowania zdjęcia w inne zdjęcie wykonane przez tego samego lub innego satelitę,
- zmiany geometrii zdjęcia,
- tworzenia mozaiki,
- przepróbkowania.

Zdjęcie satelitarne może być dopiero wtedy w pełni użyteczne, gdy jego treść, ze swej natury uporządkowana przestrzennie, zostanie odniesiona do treści map bazowych lub treści innych zdjęć stosowanych w konkretnych pracach. Dokonuje się tego w sposób numeryczny, wprowadzając do komputera wspólne punkty dla zdjęcia i mapy lub dla kolejnych geometryzowanych zdjęć. Następnie programowo dokonywane są transformacje przestrzenne zdjęcia, doprowadzające je do odwzorowania mapy.

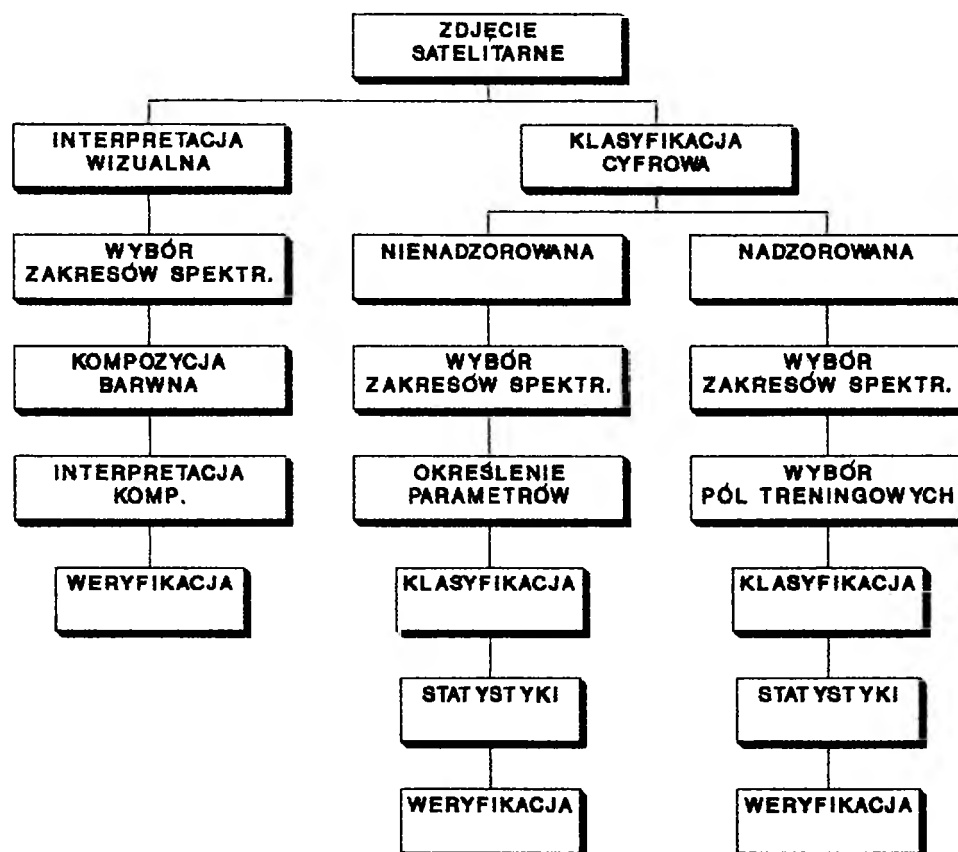
Operacje geometryzacji zdjęcia umożliwiają także jego obrócenie pod dowolnym kątem, utworzenie lustrzanego odbicia itp., co ma zastosowanie w przypadku zdjęć wykonywanych z orbit wstępujących, które często rejestrowane są w postaci lustrzanego odbicia lub obrócone o 180°.

Natomiast tworzenie mozaik jest użyteczne do łączenia dwóch stykających się lub zachodzących na siebie scen. W takim przypadku programowo wykonuje się mozaiki, w oparciu o zbiór punktów wspólnych na sąsiednich scenach.

Z kolei przepróbkowanie jest stosowane przy łączeniu zdjęć o różnej rozdzielczości, gdy zachodzi konieczność sztucznego podziału istniejących pikseli, np. ze względu na spasowywanie zdjęć o niejednakowej rozdzielczości przestrzennej. Ta operacja może zmieniać oryginalne wartości spektralne, należy więc zachować ostrożność przy jej stosowaniu.

5.1.4. Klasyfikacja zdjęcia

Klasyfikacja treści zdjęcia satelitarnego polega na nadaniu definicji pikselom pogrupowanym w oddzielne klastry, w n -wymiarowej przestrzeni spektralnej (gdzie n jest równe ilości analizowanych kanałów) lub pikselom wyróżnionym na fotograficznej odbitce zdjęcia, dzięki wspólnym cechom np. barwie. Służą temu metody numeryczna i wizualna (rys. 10). Metoda numeryczna polega na klasyfikacji wykonywanej przy użyciu komputerowego systemu przetwarzania obrazu, który umożliwia analizę zdjęcia zarejestrowanego w wielu zakresach spektralnych. Natomiast metoda wizualna opiera się na interpretacji kompozycji barwnej, złożonej jedynie z trzech wyciągów spektralnych zdjęcia satelitarnego.



Rys. 10. Schemat analizy numerycznych zdjęć satelitarnych

Kompozycję barwną uzyskuje się przez naświetlenie każdego z negatywów wybranych trzech zakresów spektralnych, jedną z trzech barw podstawowych (czerwoną, zieloną i niebieską). Do tworzenia kompozycji barwnej wybiera się te kanały które są ze sobą najmniej skorelowane, a więc te, w których występuje największa ilość różniących się informacji.

Interpretator przed rozpoczęciem klasyfikacji powinien zapoznać się z analizowanym obiektem, poznając jego charakterystyczne elementy i ich odwzorowanie na zdjęciu. Powinien przy tym pamiętać, że obserwując zdjęcie ma do czynienia z syntetycznym obrazem generalizującym zjawiska przyrodnicze.

Pierwszą czynnością przy interpretacji treści leśnej zdjęć satelitarnych obszaru Sudetów było naniesienie granicy polno-leśnej oraz głównych linii podziału przestrzennego, dróg i cieków wodnych, co ułatwia dalsze prace dzięki koncentrowaniu się jedynie na treści leśnej.

Generalnie należy stwierdzić, że wszelkie klasyfikacje zdjęć satelitarnych wymagają weryfikacji terenowych. Zastosowanie zdjęć lotniczych

(konwencjonalnych lub video) może być niezmiernie pomocne przy sprawdzeniu prawidłowości wyznaczania poszczególnych klas.

Mając do dyspozycji zdjęcia satelitarne przetworzone według zasad omówionych w poprzednich rozdziałach, można przystąpić do ich interpretacji. Najskuteczniejszym sposobem wydobycia treści ze zdjęć jest ich interpretacja wizualna.

Opierając się na zróżnicowaniu barw różnych obiektów, na barwnej kompozycji zdjęcia satelitarnego wydziela się homogeniczne obszary, którym następnie nadaje się definicję w oparciu o weryfikację sytuacji terenowej.

Nanoszenie elementów treści leśnej najlepiej jest rozpocząć od wykreślenia klas, które są wyraźnie widoczne, a więc obszarów odkrytej gleby, wylesień z pokrywą roślinną, odnowień oraz drzewostanów mieszanych i liściastych, a dopiero potem analizować inne elementy. Pozwala to skoncentrować uwagę na mniejszych fragmentach, co ma szczególne znaczenie przy wyznaczaniu klas kondycji lasu, które uwidaczniają się mniej wyraźnie i wymagają większej uwagi interpretatora niż pozostałe analizowane elementy.

Doświadczonemu interpretatorowi nie sprawia większych trudności definiowanie poszczególnych klas użytkowania ziemi i w sprzyjających warunkach można je interpretować bez weryfikacji terenowej. Trudniej jest natomiast precyzyjnie określać zasięg niektórych klas leśnych, a szczególnie kondycję lasu, do czego dane terenowe są niezbędne.

Ze względu na wielkość elementarnej powierzchni wydzielanej na zdjęciu (3 x 3 piksele lub w najlepszym razie 2 x 2 piksele) wyniki interpretacji wizualnych przenosi się na mapę sposobami uproszczonymi. Dlatego też wykonanie, na podstawie interpretacji wizualnej zdjęcia satelitarnego, mapy stanu lasu w rozumieniu kartograficznym, wystarczy dokonać jednym z uproszczonych sposobów wpisywania zdjęcia w mapę, rutynowo stosowanych w fotointerpretacji i kartografii (Ciołkosz i in., 1986).

Klasyfikacje cyfrowe, aczkolwiek nie tak dokładne, jak interpretacja wizualna, znajdują powszechne zastosowanie w klasyfikowaniu zdjęć satelitarnych. Ich atutem w porównaniu do analizy wizualnej jest szybkość wykonywania oraz postać cyfrowa finalnego produktu, która umożliwia, bez dodatkowych operacji, integrację z numerycznymi bazami danych systemów informacji przestrzennej.

Klasyfikacja cyfrowa, będąca przykładem analizy ilościowej, w sposób programowy pozwala na oddzielne analizowanie wartości spektralnej każdego piksela. Piksele o wartościach spektralnych mieszczących się w określonych zakresach tworzą jednorodne klasy, zlokalizowane przestrzennie. Klasyfikacje cyfrowe mogą być wykonywane metodami nadzorowaną lub nienadzorowaną.

W metodzie nienadzorowanej każdy piksel przyporządkowany jest do klasy "spektralnej" w sposób niejako mechaniczny, bez znajomości jej charakterystyki terenowej. Dopiero po wykonaniu całej operacji poszczególnym wydzielonym klasom nadawane są nazwy w wyniku weryfikacji wydzielonych obszarów.

Proces klasyfikacji nienadzorowanej polega na analizie spektralnej pikseli, a następnie na łączeniu ich w grupy o podobnych wartościach. Powstałe grupy nazywane są klasami spektralnymi lub klastrami. Ich wydzielenie odbywa się za pomocą analizy sekwencyjnej lub iteracji.

W metodzie analizy sekwencyjnej piksele są analizowane linia po linii i grupowane na podstawie zadanego dystansu spektralnego. Iteracja polega natomiast na grupowaniu pikseli na podstawie kolejnych prób, w taki sposób aby dystans spektralny pomiędzy klasami spełniał zdefiniowane przez interpretatora kryteria.

W metodzie nadzorowanej jest wymagana znajomość typów powierzchni, które powinny być wydzielone na zdjęciu satelitarnym, a decyzję podejmuje interpretator, wybierając powierzchnie treningowe (wzorce klasyfikacyjne) o odpowiednich charakterystykach spektralnych.

Dokładność klasyfikacji nadzorowanej zależy głównie od właściwego wyboru pól treningowych reprezentujących w sposób spektralny wszystkie wydzielane klasy.

5.1.5. Operacje poklasyfikacyjne

Do zespołu operacji poklasyfikacyjnych zalicza się:

- wygładzanie obrazu,
- łączenie klas,
- określanie barw,
- ustalanie legendy i opisów,
- wyprowadzanie statystyk,
- transformacja rastrowo-wektorowa.

Wygładzanie obrazu polega na likwidacji pikselowej struktury granic wydzielonych klas. Dokonuje się tego stosując odpowiednie filtry wygładzające, dzięki którym otrzymuje się obraz z płynnym przebiegiem granic wyznaczonych klas. Ta operacja ma jedynie znaczenie kosmetyczne i nie zmienia w sposób istotny statystyk poklasyfikacyjnych.

Po wykonaniu klasyfikacji zdjęcia satelitarnego istnieje możliwość prezentacji wyników z pełnym zakresem wydzielonych klas lub też można poszczególne klasy łączyć ze sobą. Ta operacja, poza rolą prezentacyjną może też służyć do łączenia klas przenikających się, które wyznaczono z niewielką dokładnością. W ramach edycji obrazu poklasyfikacyjnego można określić barwy wyznaczonych klas, sformułować legendę oraz opisy. Istnieje także możliwość wyprowadzenia statystyk powierzchniowych dotyczących wyznaczonych klas, zarówno w postaci wykresów, jak i zestawień tabelarycznych.

Do operacji poklasyfikacyjnych należy także konwersja rastrowo-wektorowa, która umożliwia zamianę obrazu o strukturze "pikselowej" na obraz wektorowy. Umożliwia to wprowadzanie wyników klasyfikacji do baz danych przestrzennych, o różnej postaci zapisu.

5.2. Informacje o stanie lasu otrzymane ze zdjęć satelitarnych

Dla obszaru Sudetów Zachodnich zgromadzono serię zdjęć satelitarnych wykonanych przez amerykańskie satelity Landsat skanerem Thematic Mapper (TM) i Multi-Spectral Scanner (MSS), a także przez satelity SPOT (Francja), Kosmos (Rosja) i ERS-1 (Europejska Agencja Kosmiczna), począwszy od 1982 r.

Podstawowa różnica między zdjęciami powierzchni Ziemi, wykonanymi przez satelity Landsat, SPOT i Kosmos wynika ze sposobu rejestracji danych. Systemy amerykański i francuski operują rejestracją skanerową z zapisem cyfrowym, a system rosyjski - rejestracją fotograficzną. Skaner MSS rejestruje 4 zakresy spektralne, skaner TM - 7 zakresów, skaner HRV, zainstalowany na satelicie SPOT - 4 zakresy, a satelity serii Kosmos dostarczają zdjęć panchromatycznych i spektrostrefowych w postaci analogowej. Zdjęcia spektrostrefowe z satelitów serii Kosmos wykonywane są kamerami o ogniskowej około 1000 mm, na dwuwarstwowym filmie negatywowym SN-10, rejestrującym promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie 570 - 800 nm i rozdzielczości 145 - 160 linii/mm.

W przeciwieństwie do wymienionych wyżej satelitów rejestrujących zdjęcia w zakresach optycznych, satelita Europejskiej Agencji Kosmicznej - ERS-1 pozyskuje zdjęcia powierzchni Ziemi, wykorzystując promieniowanie mikrofalowe. Satelita ERS-1 został wyposażony w cały kompleks urządzeń radarowych do pozyskiwania danych w systemie aktywnym. Spośród nich jedynie radiolokator, czyli aktywny system mikrofalowy (AMI-Active Microwave Instrument) z anteną syntetyczną (Synthetic Aperture Radar Image Mode), jest przeznaczony do pozyskiwania wysokorozdzielczych zdjęć obszarów lądowych. Radiolokator SAR operujący w paśmie C (ok. 6 cm) z wertykalną polaryzacją fali wysyłanej i odbieranej (VV) wykonuje zdjęcia pasa terenu o szerokości 100 km.

5.2.1. Analiza zdjęć pozyskanych w zakresach optycznych

Sposoby interpretacji wymienionych zdjęć satelitarnych były zdeterminowane technikami ich rejestracji. Zdjęcia spektrostrefowe otrzymywane w postaci diapozytywów, analizowano wizualnie. Zdjęcia z Landsata i SPOT-a, zapisane cyfrowo, analizowano stosując metody numeryczne i hybrydowe.

Szczególą cechą zdjęć wykonywanych na filmie SN-10, przez satelity serii Kosmos, jest dobra rozróżnialność drzewostanów iglastych i liściastych oraz zrębów i młodników. Gatunki iglaste i liściaste są na tych zdjęciach odwzorowane jako obiekty o skrajnie różnych wartościach odbicia spektralnego, tak jak na innych zdjęciach spektrostrefowych zróżnicowane są drzewa żywe i martwe.

Drzewa i krzewy liściaste odwzorowują się na filmie SN-10, jako obiekty o dużej jasności spektralnej, natomiast drzewostany iglaste rejestrowane są przez ten film jako obiekty o niskim odbiciu. Możliwość stratyfikowania zdrowotności lasu jest tu więc ograniczona zarówno budową filmu, jak i grubością warstwy atmosfery, maskującej subtelne zmiany w koronach drzew. Ze względu na swą wysoką rozdzielczość terenową, zdjęcia otrzymywane z satelitów Kosmos mogą być użyteczne do precyzowania granic lasu oraz do wydzielania obszarów o zakłóconym zwarcu, co może być pierwszym objawem osłabienia lasu. Jednakże przydatność tych zdjęć do oceny stanu lasów zdegradowanych, z czym mamy do czynienia w Sudetach, jest ograniczona, a ponadto zdjęcia te są dystrybuowane w sposób nieoperacyjny. Dlatego też nie były one przedmiotem szczegółowych analiz, zostały jedynie wykorzystane jako źródło danych uzupełniających.

W przypadku zdjęć wykonywanych przez satelity SPOT i Landsat, mamy do czynienia z zapisem cyfrowym lub kopiami fotograficznymi. Zapis cyfrowy umożliwia szczegółowe analizy poprzez dokonywanie odpowiednich przetworzeń zwiększających informacyjność zdjęcia. Uwypuklenie treści leśnej na zdjęciach wykonywanych przez satelitę SPOT w trzech zakresach spektralnych, w zasadzie ogranicza się do przetworzeń cyfrowych. Nieco inna sytuacja ma miejsce w przypadku siedmiokanałowego skanera TM. Analiza własności spektralnych badanych obiektów i charakterystyka poszczególnych zakresów, rejestrowanych przez skaner, pozwala wybrać do badań te kanały, w których występuje najwięcej informacji o interesujących obiektach i zjawiskach.

W przypadku lasów zdrowych zakres treści, jaki można wydzielić na zdjęciach Landsat TM i SPOT HRV, jest podobny. Wyższa rozdzielczość terenowa zdjęć wykonywanych przez satelitę SPOT przemawia za tym, aby właśnie je wykorzystywać do tego typu analiz. Natomiast w przypadku stosowania zdjęć satelitarnych do badania lasów uszkodzonych i zdegradowanych korzystniejsze jest wykorzystanie zdjęć, wykonywanych przez satelitę Landsat skanerem TM, ze względu na rejestrację promieniowania elektromagnetycznego w zakresie średniej podczerwieni, w którym różnicują się drzewa zdrowe i uszkodzone. Ten zakres promieniowania elektromagnetycznego nie jest rejestrowany przez satelitę Spot.

W prezentowanych badaniach wykorzystywano więc zdjęcia wykonane skanerem Thematic Mapper, z pokładu satelity Landsat. Zdjęcia te były pozyskane w 1984 i 1990 r.

Dobór zakresów spektralnych, rejestrowanych przez skaner TM, umożliwia badanie różnorodnych zjawisk i elementów przyrodniczych. Według informacji EARTHNET (instytucji zajmującej się dystrybucją materiałów satelitarnych), poszczególne kanały TM mogą znajdować następujące zastosowania:

Kanał TM 1 - 0.45 - 0.52 μm - badanie wód, odróżnianie gleby od roślinności, drzew iglastych od liściastych.

- Kanał TM 2 - 0.52 - 0.60 μm - pomiar maksymalnych wartości odbicia promieniowania elektromagnetycznego od pokrywy roślinnej w zakresie zieleni, ocena pokrywy roślinnej.
- Kanał TM 3 - 0.63 - 0.69 μm - zakres absorpcji chlorofilu umożliwiający identyfikację typów roślinności.
- Kanał TM 4 - 0.76 - 0.90 μm - szacowanie biomasy i wydzielanie zbiorników wodnych.
- Kanał TM 5 - 1.55 - 1.75 μm - określenie turgoru roślin oraz wilgotności gleb. Rozróżnianie chmur od śniegu.
- Kanał TM 6 - 10.40 - 12.50 μm - podczerwień termalna. Analizy wilgotności gleb i zdrowotności roślin.
- Kanał TM 7 - 2.08 - 2.35 μm - identyfikacja typów skał, kartografia hydrotermalna.

Charakterystyki spektralne lasów na powierzchniach testowych, rejestrowane w siedmiu kanałach zdjęcia TM wykonanego w 1990 r, porównywano z terenowymi parametrami drzewostanów. Stwierdzono szereg istotnych zależności odnośnie do wskaźników defoliacji, odbarwienia oraz kondycji (Zawiła-Niedźwiecki i in., 1992). Przedstawiono je w modelach, opisujących - osobno dla każdej ekspozycji stoku - zależności pomiędzy tymi wskaźnikami, a charakterystykami spektralnymi, rejestrowanymi przez skaner TM:

Wystawa północna:

- (1) $Df = -5.99TM1 + 6.82TM3 + 0.64TM4 - 1.24TM5 + 0.35Wiek$ $R^2a=0.96$
 (2) $Dc = -2.23TM1 + 2.58TM3 + 0.06Wiek$ $R^2a=0.87$
 (3) $Dm = -0.18TM1 + 0.24TM3 + 0.02Wiek$ $R^2a=0.95$

Wystawa północno-wschodnia:

- (4) $Df = -5.34TM1 + 10.3TM2 - 5.41TM3 - 0.26TM4$ $R^2a=0.94$
 (5) $Dc = -2.40TM1 + 2.55TM2 - 0.13TM4$ $R^2a=0.77$
 (6) $Dm = -0.29TM1 + 0.59TM2 - 0.36TM3 - 0.01TM4$ $R^2a=0.94$

Wystawa wschodnia:

- (7) $Df = -5.56TM1 + 5.87TM2 - 0.27TM4 + 0.21Wiek$ $R^2a=0.88$
 (8) $Dc = -1.93TM1 + 2.67TM3 - 0.22TM5 + 0.05Wiek$ $R^2a=0.55$
 (9) $Dm = -0.28TM1 + 0.28TM2 - 0.01TM4 + 0.01Wiek$ $R^2a=0.90$

Wystawa południowo-wschodnia:

- (10) $Df = 17.14TM2 - 21.92TM3 - 1.07TM4 + 5.10TM7$ $R^2a=0.90$
 (11) $Dc = -1.18TM1 - 1.93TM3 - 0.15TM4 + 0.09Wiek$ $R^2a=0.51$
 (12) $Dm = 0.61TM2 - 0.73TM3 - 0.06TM4 + 0.11TM5$ $R^2a=0.91$

Wystawa południowa:

- (13) $Df = -5.19TM1 + 6.38TM2 - 0.46TM5$ $R^2a=0.97$
 (14) $Dc = -1.98TM1 + 2.37TM2 - 0.32TM5$ $R^2a=0.83$
 (15) $Dm = -0.31TM1 + 0.36TM2 - 0.01TM4$ $R^2a=0.97$

Wystawa południowo-zachodnia:

- (16) $Df = 17.41TM2 - 20.91TM3 - 1.12TM4 + 2.85TM7 + 0.24Wiek$ $R^2a = 0.91$
 (17) $Dc = -1.88TM1 + 2.48TM2 - 0.23TM4$ $R^2a = 0.77$
 (18) $Dm = 0.90TM2 - 1.13TM3 - 0.05TM4 + 0.17TM7 + 0.01Wiek$ $R^2a = 0.95$

Wystawa zachodnia:

- (19) $Df = -8.33TM1 + 7.74TM2$ $R^2a = 0.93$
 (20) $Dc = -8.22TM1 + 9.53TM3$ $R^2a = 0.53$
 (21) $Dm = -0.42TM1 + 0.44TM2 - 0.01TM4$ $R^2a = 0.96$

Wystawa północno-zachodnia:

- (22) $Df = -8.68TM1 + 9.23TM2 - 1.81TM5 + 0.28Wiek$ $R^2a = 0.94$
 (23) $Dc = 0.58TM4 - 1.97TM5 + 2.40TM7$ $R^2a = 0.78$
 (24) $Dm = 0.06TM4 - 0.13TM5 + 0.02Wiek$ $R^2a = 0.95$

Jak widać z powyższego zestawienia, w przypadku modeli dotyczących defoliacji i kondycji otrzymano wysokie wskaźniki korelacji - R^2a powyżej 0.90, a dla drzewostanów porastających południowe stoki nawet przekraczający 0.97. Jedynie w przypadku równań opisujących odbarwienie igieł, w drzewostanach zlokalizowanych na wschodnich, południowo-wschodnich i zachodnich stokach, R^2a nie osiąga 0.55, a w najlepszym przypadku (dla północnego stoku) dochodzi do 0.87.

Podczas obliczeń próbowano włączyć do modeli także niektóre terenowe parametry drzewostanów jako jedną ze zmiennych niezależnych. Jedynie wiek drzewostanów okazał się związany ze wskaźnikami kondycji, ale w wielu przypadkach i ta zmienna uległa eliminacji.

Omawiane modele opisujące zależności wskaźników defoliacji, odbarwień igieł i kondycji drzew od charakterystyk spektralnych drzewostanów, rosnących na stokach o różnych ekspozycjach, znajdują zastosowanie w klasyfikacjach zdjęć satelitarnych, wykonywanych w odniesieniu do mapy wystaw, wygenerowanej z numerycznego modelu terenu.

Drzewostany zlokalizowane na zachodnich i południowych wystawach opisane są równaniami zawierającymi najmniejszą ilość zmiennych niezależnych. W przypadku defoliacji drzewostanów zlokalizowanych na stokach o wystawie zachodniej duża korelacja ($R^2a = 0.93$) została osiągnięta przy zastosowaniu jedynie dwóch widzialnych zakresów widma rejestrowanego w kanałach TM1 i TM2.

Największe ilości zmiennych występują w modelach opisujących defoliację (Df) na wystawach północnej i południowo-zachodniej oraz kondycję drzew (Dm) na wystawie południowo-zachodniej (po 5 zmiennych). Częstotliwość

występowania w kolejnych modelach wartości spektralnych, otrzymanych w poszczególnych kanałach TM może świadczyć o tym, że w przypadku defoliacji główny ciężar opisywania drzewostanu spoczywa na widzialnych zakresach widma. Ponadto, kanały TM1 i TM2, mimo wysokiej wzajemnej korelacji często występują w jednym modelu obok siebie (w 5 na 8 modeli). Natomiast w przypadku wskaźnika kondycji większą rolę niż w modelach opisujących Df i Dc odgrywa kanał podczerwieni fotograficznej (TM4), występujący w siedmiu spośród ośmiu modeli. Jednakże i w tym przypadku znaczną rolę odgrywają zakresy widzialne, a szczególnie rejestrowane w kanałach TM1 i TM2, które także tutaj mogą występować obok siebie w jednym równaniu. W 14 modelach (na 24) występuje jeden z trzech zakresów podczerwieni (TM4, TM5 lub TM7). W siedmiu równaniach wartości spektralne rejestrowane w dwóch kanałach podczerwonych występują obok siebie (np. Df na wystawach N, SE, SW; Dm na SW i NW oraz Dc na NW), ale każdy z nich reprezentuje inny przedział podczerwieni (fotograficzna - TM4 oraz średnia - TM5 i TM7). Tak więc w jednym modelu nie występują obok siebie kanały podczerwone (TM5 i TM7), rejestrujące podobny zakres informacji (silna korelacja pomiędzy odpowiedziami spektralnymi rejestrowanymi przez te kanały). Natomiast w przypadku kanałów widzialnych TM1 i TM2 można stwierdzić, że dostarczają one komplementarnych informacji, o czym może świadczyć ich występowanie obok siebie w jednym modelu, pomimo wysokiej korelacji odpowiedzi spektralnych rejestrowanych przez te kanały TM.

Ogólnie można stwierdzić, że najwięcej zmiennych zawierają modele opisujące defoliację, na drugim miejscu plasują się modele opisujące kondycję drzew, a najmniej zmiennych występuje w modelach opisujących odbarwienie, aczkolwiek nie są to różnice znaczące.

Zmienna "wiek" okazała się istotna w czterech modelach opisujących Df, w trzech modelach opisujących Dc oraz w czterech modelach opisujących Dm. Zmienna ta ma znaczenie na stokach północnych, wschodnich i południowo-zachodnich, a dla Df i Dm dodatkowo jeszcze na północno-zachodnich. Fakt ten może wskazywać, że na stokach: północnych, wschodnich, południowo-zachodnich i północno-zachodnich występują drzewostany, których kondycja, pomimo procesów degradacyjnych, ciągle jeszcze zmienia się w funkcji wieku. Prawidłowości tej nie można potwierdzić w przypadku pozostałych modeli.

W wyniku opisanych powyżej analiz stwierdzono, że spośród trzech parametrów kondycji lasu (Df, Dc i Dm), wskaźniki Df i Dm wydają się być najbardziej użyteczne do oceny jego kondycji z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych. Zwłaszcza wskaźnik Dm (Dmyterko i Grzyb, 1990) jest silnie skorelowany z charakterystykami spektralnymi, otrzymanymi z danych satelitarnych TM. Natomiast odbarwienie igieł, podobnie jak ma to miejsce w inwentaryzacjach przeprowadzonych na podstawie wytycznych ICP - Forest, należy traktować jedynie jako informację uzupełniającą.

Oprócz analiz statystycznych, mających na celu znalezienie relacji pomiędzy parametrami terenowymi drzewostanów, a ich charakterystykami spektralnymi, otrzymywanymi ze zdjęć TM, wykonywano klasyfikacje nadzorowane zdjęć satelitarnych, pozyskanych w latach 1984 i 1990, a także ich interpretacje wizualne.

W przypadku interpretacji wizualnej do badań wybiera się zdjęcia wykonane w tych zakresach spektrum, które niosą najwięcej informacji o badanym obiekcie. W tym celu konieczne jest przeanalizowanie zasobu informacji i przydatności do oceny lasu zdjęć, wykonanych w poszczególnych zakresach spektrum. O zasobie informacji zawartych na zdjęciach można wnioskować w wyniku analizy histogramów i korelacji wartości odbicia promieniowania elektromagnetycznego rejestrowanego przez poszczególne kanały skanera TM.

Analiza histogramów zdjęć, wykonanych w poszczególnych kanałach, pozwala uszeregować je według liczebności tonów szarości, która świadczy o pojemności informacyjnej. W badanym obszarze Gór Izerskich i Karkonoszy liczebność tonów szarości w poszczególnych kanałach przedstawia się następująco:

- kanał 1 - 54 tonów szarości - od 62 do 116,
- kanał 2 - 39 tonów szarości - od 22 do 61,
- kanał 3 - 58 tonów szarości - od 18 do 76,
- kanał 4 - 131 tonów szarości - od 18 do 149,
- kanał 5 - 126 tonów szarości - od 8 do 134,
- kanał 6 - 31 tonów szarości - od 115 do 146,
- kanał 7 - 68 tonów szarości - od 0 do 68.

Jak widać z powyższego zestawienia, kanały TM 4 i 5 zawierają najwięcej tonów szarości, a więc, jak można wnioskować, i największą ilość informacji. Zmiany zdrowotne wyrażają się w tych właśnie zakresach. Wyraźnie wyróżniają się także druga grupa kanałów TM 7, 3 i 1, które również mogą być użyteczne w badaniu lasu.

Do sporządzania kompozycji barwnej najkorzystniejsze jest wybranie tych wyciągów spektralnych, które zawierają dużą ilość informacji (o czym dane uzyskano z analizy histogramów) oraz które posiadają najniższą korelację odpowiedzi spektralnych. Wysoka korelacja świadczy o podobnej zawartości informacyjnej badanych kanałów, a chodzi przecież o to, aby wybrane do analizy zakresy dostarczały maksimum informacji i aby ta informacja, o ile to możliwe, nie powtarzała się.

Wartości spektralne pikseli w poszczególnych kanałach można traktować jako zmienne losowe, a więc do ich badania możemy stosować miary statystyczne. Statystyczne porównanie informacji zawartych na zdjęciach wykonanych w poszczególnych zakresach spektralnych dokonuje się za pomocą programu obliczającego średnie, wariancje i odchylenia standardowe wartości spektralnych zbiorów pikseli, jakimi są poszczególne wyciągi spektralne. Następnie z miary rozproszenia (kowariancji) i odchyłeń standardowych oblicza się współczynniki korelacji liniowej pomiędzy każdymi dwoma kanałami TM.

Komentując te dane należy podkreślić małą korelację pomiędzy TM 6 a pozostałymi kanałami. Jednakże ze względu na małą rozdzielczość i bardzo specjalistyczny zakres zastosowań zdjęć wykonanych w tym przedziale spektrum (podczerwień termalna) kanał ten jest rzadko brany pod uwagę w analizie lasów na podstawie zdjęć satelitarnych. Porównując współczynniki korelacji różnych kombinacji trójek kanałów zauważa się, że najmniejsza zależność istnieje pomiędzy odbiciem promieniowania elektromagnetycznego zarejestrowanym w kanałach 1, 4 i 7. Użyteczność zakresu TM1 do badań lasu podkreślają między innymi Williams i Nelson (1986). Biorąc jednak pod uwagę fakt, że TM1 rejestruje fragment zakresu widzialnego, w którym mają miejsce znaczne zakłócenia atmosferyczne, korzystne jest zastosowanie innego kanału o podobnym zasobie informacji, natomiast w miarę możliwości pozbawionego zakłóceń. Wpływ atmosfery na promieniowanie rejestrowane w kanałach TM5 i TM7 jest minimalny, a na promieniowanie rejestrowane w kanale TM4 słaby przy wysokości Słońca w przedziale 25 - 90° (Rosengren i Ekstrand, 1987). Natomiast w zakresach widzialnych występuje znaczny wpływ atmosfery na transmisję promieniowania elektromagnetycznego. Najmniejszy wpływ atmosfery w zakresach TM3 i TM4 ma miejsce, gdy Słońce znajduje się wysoko nad horyzontem.

Kolejną, najmniej skorelowaną trójkę kanałów (już bez TM1) tworzą TM3, TM4 i TM7. Silna korelacja odpowiedzi spektralnych, rejestrowanych przez kanały trzeci i pierwszy pozwala wnioskować, że zawierają one podobny zakres informacji. Jednakże kanał trzeci wydaje się bardziej użyteczny, gdyż przedział promieniowania przez niego rejestrowany w mniejszym stopniu podlega wpływom atmosfery, a ponadto zdjęcie otrzymane w tym kanale charakteryzuje nieco szerszy zakres tonów szarości.

Silna korelacja istnieje również pomiędzy kanałami TM5 i TM7, co pozwala sądzić, że treść zdjęć wykonanych w tych kanałach jest zbliżona. Lillesand i in. (1986) twierdzą, że promieniowanie rejestrowane w kanale piątym pozwala na najlepsze rozróżnianie klas leśnych, a kanał ten wraz z czwartym, są najważniejszymi kanałami w badaniu lasu. Horler i Ahern (1986) zauważają, że zdjęcie w kanale piątym Thematic Mapper jest najbardziej użyteczne do wydzielenia zrębów i monitorowania odnowień lasu, i że ten zakres jest najbardziej czuły na różnice gęstości roślinności leśnej, szczególnie w młodszych fazach regeneracji. Ci sami autorzy polecają do analiz lasu stosowanie kanałów 3, 4 i 5. Cibula (1985) dowodzi, że w zakresie TM5 odzwierciedlają się zmiany w roślinach dotkniętych suszą. Natomiast Williams i Nelson (1986) uważają, że do szacowania ubytku aparatu asymilacyjnego, szczególnie użyteczny jest kanał siódmy, który umożliwia ponadto, według Lillesanda i in. (1986), łatwe wydzielenie granicy polno-leśnej.

W wyniku wykonanych prac na obszarze Sudetów Zachodnich stwierdzono, że do wizualnej interpretacji zdjęć, mającej na celu ocenę kondycji lasów świerkowych, należy wykorzystywać kanały TM3, TM4, TM5 i TM7, ze szczególnym uwzględnieniem informacji otrzymanych w wyniku wagowań kanałów 4 przez 3 i 5 przez 4.

Przeprowadzając interpretację wizualną zdjęcia Sudetów stwierdzono, że w zależności od kanału, w którym dokonano rejestracji, zawierają one informacje umożliwiające wydzielenie poszczególnych elementów charakteryzujących las. I tak: zdjęcie wykonane w kanale trzecim skanera TM umożliwia wydzielenie drzewostanów iglastych, w kanale czwartym najlepiej wyróżniają się drzewostany mieszane i liściaste oraz obszary trawiaste, a wykonane w kanałach 5 i 7 mogą służyć do wydzielenia wylesień z odkrytą glebą oraz znacznych ubytków aparatu asymilacyjnego w drzewostanach iglastych. Natomiast wagowanie kanałów 4/3 jest przydatne do wydzielenia drzewostanów mieszanych i liściastych oraz młodszych klas wieku drzewostanów świerkowych (ale mogą tutaj wystąpić trudności z odróżnieniem ich od siebie), a także obszarów trawiastych i odnowień. Z kolei wagowanie kanałów 5/4 jest szczególnie przydatne do wydzielenia uszkodzonych drzewostanów iglastych.

Pierwszą czynnością w ramach właściwej interpretacji zdjęć satelitarnych obszaru Sudetów była stratyfikacja obrazu na tereny leśne i nieleśne. Optymalnym wariantem jest stosowanie do tego celu odpowiednich warstw informacyjnych przestrzennej bazy danych leśnego systemu informacyjnego. Gdy nie jest to możliwe, do rozróżniania leśnych klas użytkowania ziemi od klas nieleśnych należy stosować kanały TM2 i TM5.

W zakresie TM2 doskonale różnicuje się las od innych form użytkowania ziemi. Natomiast dzięki informacjom zarejestrowanym w zakresie TM5 można uniknąć błędów w rozróżnieniu lasów od wód, które są podobnie odwzorowane w kanale 2 Thematic Mapper. Niekiedy do tego samego celu może być przydatny kanał termalny - TM6. Jednakże rozdzielczość zdjęć rejestrowanych w tym zakresie jest czterokrotnie niższa niż w pozostałych kanałach TM.

Kolejnym krokiem w interpretacji treści leśnej zdjęcia satelitarnego było rozróżnienie w obszarach leśnych drzewostanów iglastych, liściastych i mieszanych oraz zrębów i odnowień. Najlepszym kanałem do wydzielenia poszczególnych typów drzewostanów jest TM4. Gdyby jednak ich rozróżnienie nie było możliwe, należy się posłużyć kanałem różnicowym TM4-TM2.

Tak przygotowane zdjęcia poddano stratyfikacji kondycji drzewostanów świerkowych. W przypadku interpretacji drzewostanów porastających stoki zacienione dokonywano wagowań kanałów 5 i 4 oraz 4 i 3, co zdecydowanie poprawia dokładność klasyfikacji. Do stratyfikacji drzewostanów świerkowych najlepiej jest stosować kanały TM5/4 i TM4/3, na których zróżnicowanie tonalne odwzorowuje kondycję lasu. Gdy jakość zdjęcia jest bardzo dobra (co jest warunkowane oświetleniem i przezroczystością atmosfery), możliwe jest stratyfikowanie kondycji drzewostanów na podstawie pojedynczych kanałów TM. W takim przypadku zakres TM3 umożliwia wydzielenie drzewostanów świerkowych zamierających, a zakresy TM4 i TM7 drzewostanów lekko uszkodzonych.

Analiza zdjęć satelitarnych przedstawiających obszar Sudetów Zachodnich wykazuje, że zróżnicowanie spektralne obrazu górskich lasów świerkowych na zdjęciach satelitarnych TM umożliwia wydzielenie maksimum trzech klas kondycji drzewostanów. Klasa I łączy w sobie drzewostany zdrowe i osłabione, o ubytku aparatu asymilacyjnego od 0% do 30%. Jak z tego wynika, nie ma możliwości rozpoznania na zdjęciach satelitarnych wstępnych stadiów uszkodzeń świerków. Dlatego też podczas wykonywania klasyfikacji nadzorowanych powierzchni treningowe, lokowane w drzewostanach o ubytku aparatu asymilacyjnego w przedziale 0-30%, należy traktować jako wzorce jednej klasy spektralnej.

Możliwość wyróżniania na zdjęciu satelitarnym kolejnych klas drzewostanów świerkowych, o ubytku aparatu asymilacyjnego powyżej 30% jest uzależniona od warunków lokalnych, takich jak: zwarcie drzewostanów, pokrywa gleby, roślinność dna lasu itp. Gdy na przykład w drzewostanie o luźnym zwarciu występuje trawiasta pokrywa gleby, odpowiedź spektralna rejestrowana na zdjęciu satelitarnym powoduje zawyżenie oceny kondycji lasu. W przeciętnych warunkach istnieje jednak możliwość wydzielenia drzewostanów o ubytku aparatu asymilacyjnego rzędu 30-60% oraz powyżej 60%, które opisywane są jako zamierające i martwe.

Interpretacja wizualna zdjęć daje dobre rezultaty w przypadku małych obszarów oraz niewielkiej ilości danych referencyjnych. Natomiast w przypadku, gdy trzeba korzystać z danych zbieranych na wielu poziomach oraz gdy trzeba dowiadywać wyniki klasyfikacji zdjęć satelitarnych do innych danych, konieczne staje się stosowanie klasyfikacji cyfrowych. Atutem tych klasyfikacji jest łatwość analiz dotyczących dużych obszarów oraz możliwość integracji uzyskanych w ten sposób informacji z już istniejącymi obiektowymi i atrybutowymi bazami danych. Minusem klasyfikacji cyfrowych, w porównaniu do interpretacji wizualnych, jest mniejsza precyzja analizy treści zdjęcia.

W procesie klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia satelitarnego wykonanego skanerem TM, obejmującego Karkonosze i Góry Izerskie, do wyboru pól testowych wykorzystano zdjęcia lotnicze, mapy oraz wyniki inwentaryzacji terenowych. Dobór i szczegółowa charakterystyka powierzchni testowych sprawiły, że w rezultacie klasyfikacji tych zdjęć wyróżniono drzewostany świerkowe osłabione, silnie osłabione oraz zamierające i martwe, a także stare i nowe zręby, odnowienia i zalesienia oraz drzewostany liściaste i mieszane (rys. 11 i 12).

W przypadku zdjęć wykonanych skanerem TM w latach 1984 i 1990 zastosowano tę samą metodę klasyfikacji. Jej wynikiem są mapy w skali 1:50000. Ponieważ układ odniesień przestrzennych obu map jest identyczny, stosunkowo prosto można było dokonać ich porównania i prześledzenia różnic, jakie zaszły w analizowanych drzewostanach w okresie 6 lat - od 1984 do 1990 r. Szczególnie wymowne jest porównanie zasięgu i prześledzenie rozprzestrzeniania się wylesień.

Mapy otrzymane w wyniku tych klasyfikacji pozwalają na sformułowanie ogólnych wniosków dotyczących stanu lasu oraz na prześledzenie zmian jakie zaszły na analizowanym obszarze (tabl. 2).

Tablica 2

Powierzchniowe wyniki klasyfikacji zdjęć TM

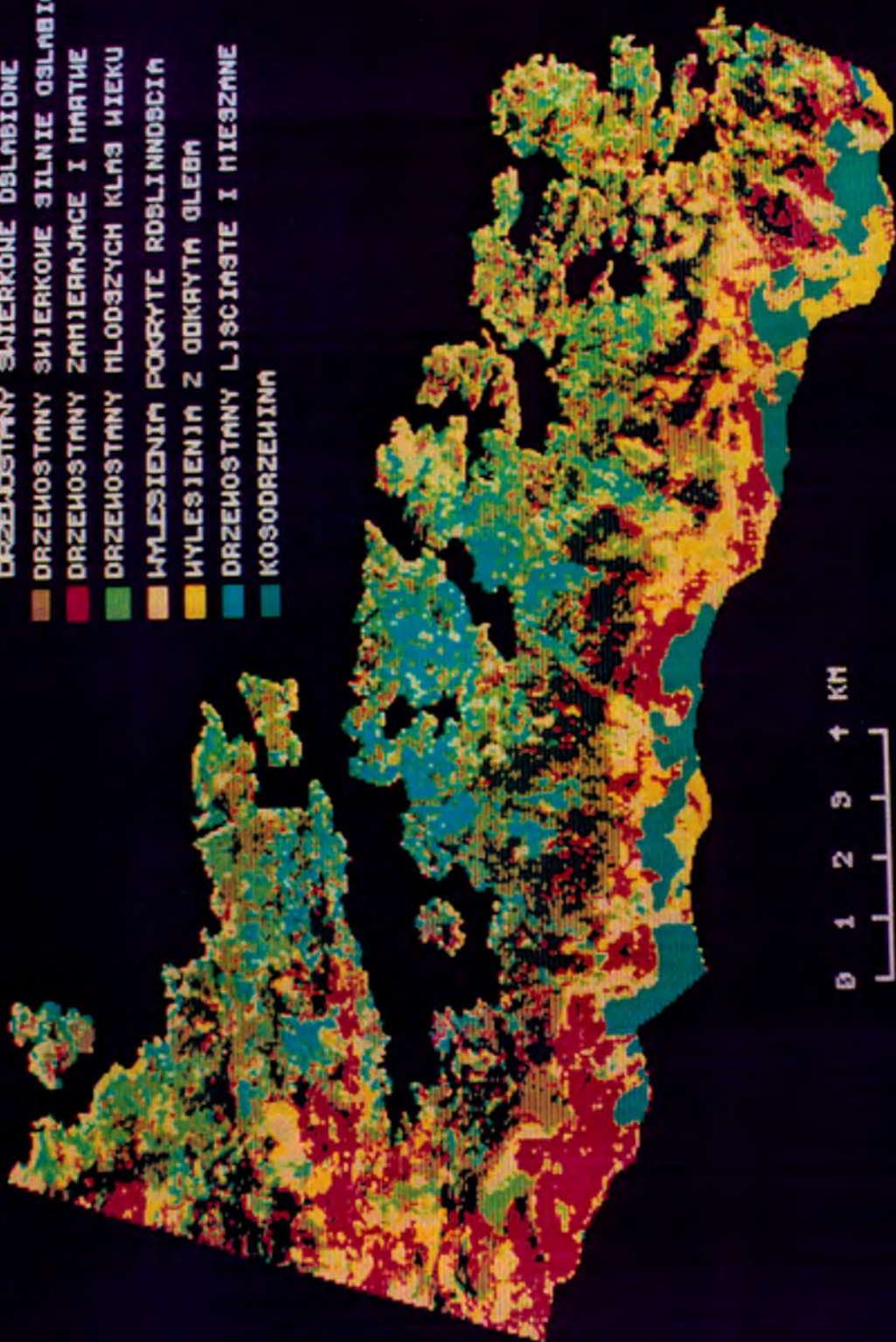
Nazwa klasy	Powierzchnia w roku 1984	Powierzchnia w roku 1990
D-stany świerkowe osłabione	2883 ha	3136 ha
D-stany świerkowe silnie osłabione	4376 ha	4433 ha
D-stany zamierające i martwe	2771 ha	1185 ha
D-stany młode i mieszane	3425 ha	2918 ha
Wylesienia pokryte roślinnością	155 ha	2389 ha
Wylesienia z odkrytą glebą	1480 ha	638 ha
Inne (kosodrzewina, drogi, kamieniołomy ...)	4544 ha	4935 ha
Razem	19634 ha	19634 ha

Porównanie map poklasyfikacyjnych (rys. 11 i 12) prowadzi do stwierdzenia, że w przeciągu 6 lat, od 1984 do 1990, na obszarze Sudetów Zachodnich nastąpiło:

- zwiększenie obszaru drzewostanów osłabionych przy ogólnym zmniejszeniu się powierzchni zajmowanej przez drzewostany starszych klas wieku (o blisko 30%),
- zmniejszenie się powierzchni zajmowanej przez drzewostany martwe i zamierające z ok. 15% do ok. 5% analizowanego obszaru,
- wzrost powierzchni wylesień (z 8 do 15% analizowanego obszaru), z tym że w przeciągu 6 lat nastąpiło zmniejszenie obszarów wylesień z odkrytą glebą na rzecz wylesień z pokrywą roślinną,
- wzrost obszaru zajmowanego przez klasę "inne", co jest wynikiem odstonięcia skał, które uprzednio były zasłonięte pułapem koron, jak również budową nowych dróg, mających ułatwić zagospodarowanie lasu.

LEGENDA

- DRZEJOSTANY SWIERKONE OSLABIONE
- DRZEJOSTANY SWIERKONE SILNIE OSLABIONE
- DRZEJOSTANY ZAMIERAJACE I MRAJNE
- DRZEJOSTANY MŁODSZYCH KLAS WIEKU
- WYLESZENIA POKRYTE ROŚLINNOŚCIĄ
- WYLESZENIA Z ODKRYTĄ GLEBĄ
- DRZEJOSTANY LJSCIASTE I MIESZANE
- KOSODRZEZINA

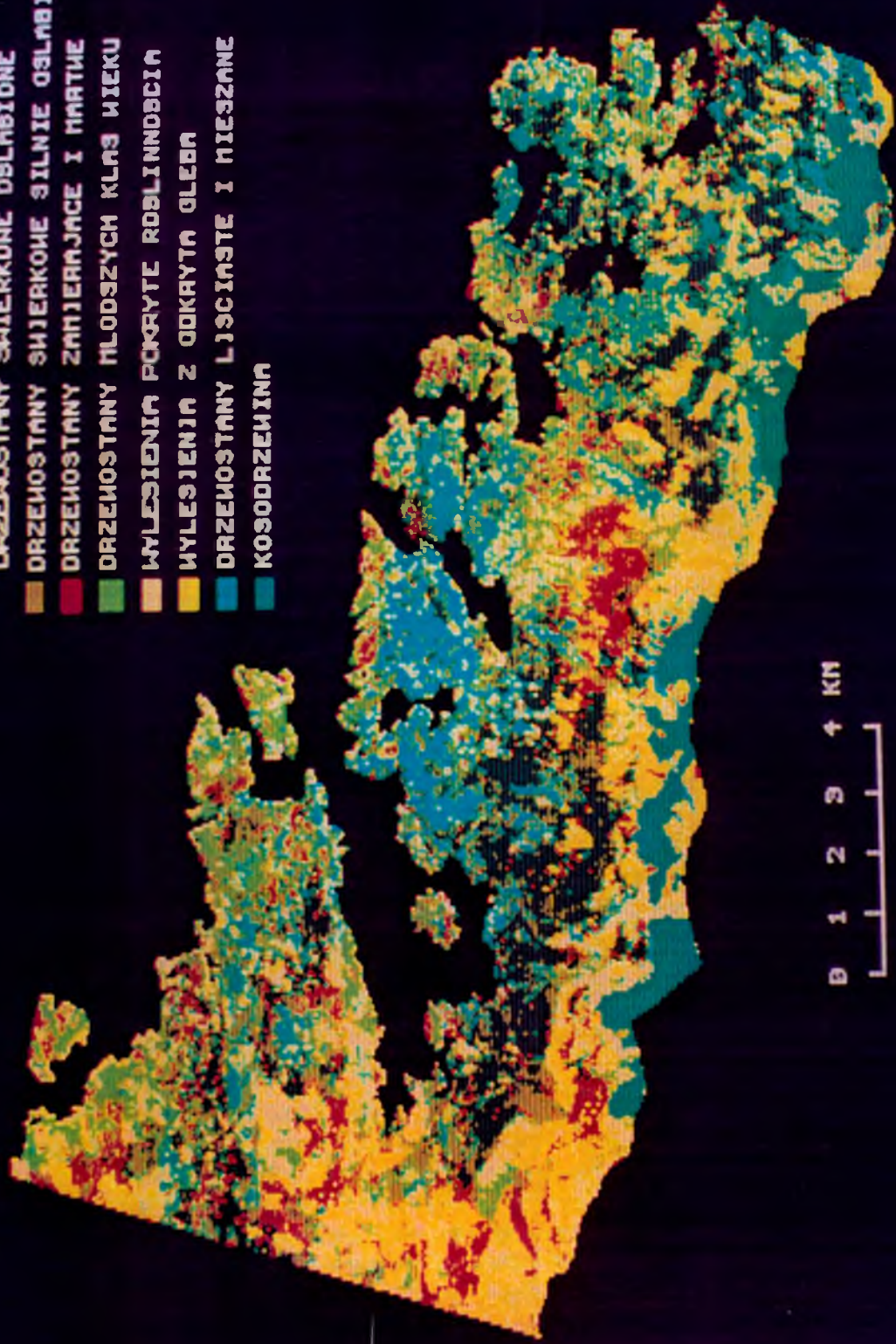


0 1 2 3 + KM

Rys. 11

LEGENDA

- DRZEJOSTANY SZWIERKONE OSŁABIONE
- DRZEJOSTANY SZWIERKONE SILNIE OSŁABIONE
- DRZEJOSTANY ZAMIERAJĄCE I MARTWE
- DRZEJOSTANY MŁODSZYCH KLAS WIEKU
- WYLESZENIA POKRYTE ROBLINNOŚCIĄ
- WYLESZENIA Z OKRYTĄ OLEJĄ
- DRZEJOSTANY LIŚCIĄSTE I MIESZANE
- KOSODRZEZINA



0 1 2 3 4 KM

Rys. 12

Wyniki otrzymane z analizy wieloterminowych zdjęć satelitarnych świadczą o tym, że pomimo zmniejszenia tempa, degradacja lasów sudeckich ciągle postępuje. Jednakże trzeba też odnotować znacznie efektywniejszą działalność służby leśnej niż miało to miejsce w pierwszej połowie lat osiemdziesiątych, o czym świadczy zmniejszenie areалу zajmowanego przez drzewostany zamierające i martwe oraz wylesienia z odkrytą glebą.

Podsumowując wyniki analiz zdjęć satelitarnych obrazujących obszar Sudetów, wykonanych w optycznych przedziałach spektrum należy stwierdzić, że zdjęcia wykonywane przez satelitę Landsat skanerem Thematic Mapper najlepiej nadają się do ocen stanu lasu w ekosystemach zagrożonych, pozwalając na wydzielenie trzech klas kondycji drzewostanów świerkowych oraz sześciu innych klas opisujących stan lasu.

5.2.2. Analiza zdjęć pozyskanych w zakresach mikrofalowych

Warunki atmosferyczne, a szczególnie długie okresy zachmurzenia i poranne mgły, często uniemożliwiały pozyskiwanie zdjęć obrazujących analizowany fragment Sudetów. Dlatego sięgnięto po zdjęcia mikrofalowe wykonywane przez satelitę ERS-1. Głównym atutem tych zdjęć, wykonywanych radarem SAR, jest możliwość ich pozyskiwania niezależnie od warunków zachmurzenia.

Analizy zdjęć wykonanych przez satelitę ERS-1 przeprowadzono w odniesieniu do zdjęć satelitarnych Landsat TM oraz do terenowych parametrów drzewostanów. Poszukując relacji pomiędzy zdjęciami ERS-1 i TM z obszaru Sudetów, przeanalizowano dane spektralne obiektów występujących na:

1 - terenach odwzorowanych na całych scenach, obejmujących różne formy użytkowania ziemi (tereny leśne, rolne, zurbanizowane, wody itd.),

2 - terenach odwzorowanych na fragmentach scen, obejmujących obszary leśne Karkonoszy (w skład których wchodziły wszystkie formy rozwojowe drzewostanów świerkowych, wylesienia oraz różne stopnie uszkodzenia lasu),

3 - terenach zajętych przez karkonoskie drzewostany świerkowe i bukowo-świerkowe, od III klasy wieku wzwyż,

4 - terenach pokrytych drzewostanami o udziale świerka powyżej 0.8, od III klasy wieku wzwyż.

Zbadano relacje wskaźnika odbicia wstecznego (σ), rejestrowanego przez satelitę ERS-1 do poszczególnych zakresów spektralnych rejestrowanych przez skaner TM, a ponadto, w przypadku analiz dotyczących drzewostanów, szukano związków pomiędzy σ a kanałami wagowanymi TM 5/4, TM 4/3, wskaźnikiem roślinności (NDVI), wskaźnikiem jasności (BR) oraz składowymi głównymi (PC 1, 2 i 3).

Przedstawione w tablicy 3 wyniki porównania zdjęć wykonanych przez satelitę Landsat TM i ERS-1 wskazują na niską korelację pomiędzy tymi zdjęciami. Współczynniki korelacji uzyskane tylko dla obszaru leśnego są niższe niż dla całej sceny. Nawet w najlepszym przypadku nie przekraczają one wartości 0.1.

Tablica 3

Współczynniki korelacji wskaźnika σ , rejestrowanego przez satelitę ERS-1, z charakterystykami spektralnymi rejestrowanymi przez skaner TM

Zakres TM	Cała scena	Obszar leśny	Wszystkie d-stany	D-stany świerkowe
1	0.10	0.06	0.06	-0.20
2	0.09	0.06	0.06	-0.29
3	0.08	0.07	0.07	-0.25
4	0.08	0.03	0.08	-0.14
5	0.10	0.07	0.11	-0.11
6	0.10	0.03	0.17	0.02
7	0.08	0.08	0.06	-0.21
5/4			0.09	0.10
4/3			0.03	0.17
NDVI			0.04	0.18
BR			0.09	-0.15
PC1			0.10	-0.15
PC2			0.01	0.07
PC3			-0.03	-0.14

Analiza wyników odnoszących się do wszystkich drzewostanów wykazuje, że najwyższy współczynnik korelacji charakteryzuje związek wskaźnika z promieniowaniem zarejestrowanym w kanale TM6, ale wartość ta jest i tak niewielka (0.17). Sytuacja nieco się poprawia przy ograniczeniu badanej populacji tylko do drzewostanów świerkowych. W takim przypadku następuje wzrost współczynników korelacji odnoszących się do widzialnych zakresów widma, TM 7, PC i wagowań TM 5/4, TM 4/3 oraz NDVI i BR, ale ciągle jeszcze związki pomiędzy danymi ERS-1 i TM nie są silne (w najlepszym przypadku osiągają wartość 0.29). Jak z tego widać nie istnieje istotna relacja pomiędzy danymi zapisanymi na zdjęciach radarowych i optycznych. Ten wniosek może świadczyć o tym, że zastosowanie zdjęć ERS-1 wzbogaci informacje, jakich dostarczają zdjęcia wykonane w optycznym zakresie widma, gdyż niska korelacja dowodzi, że oba typy zdjęć zawierają inne zakresy informacji o środowisku.

Kolejnym krokiem w analizie zdjęć wykonanych przez satelitę ERS-1 obejmujących tereny Sudetów było poszukiwanie relacji pomiędzy wskaźnikiem σ a parametrami drzewostanów. Te analizy prowadzono w odniesieniu do:

- 1 - drzewostanów świerkowych (udział świerka powyżej 0.8),
- 2 - drzewostanów świerkowych rosnących na stokach o wystawach NE, E

oraz SE, a więc najkorzystniejszych z punktu widzenia oświetlenia wiązką radarową,

- 3 - drzewostanów świerkowych o zwarcu powyżej 0.8,
- 4 - drzewostanów świerkowych o zwarcu powyżej 0.8, porastających wystawy NE, E i SE.

Wyniki badań przedstawione w tablicy 4 wskazują, że związki obrazu drzewostanów na zdjęciach radarowych z ich poszczególnymi parametrami terenowymi są niewielkie. Przy badaniu pełnej populacji drzewostanów świerkowych osiągnięto najwyższy współczynnik korelacji, wynoszący zaledwie 0.34. Wyrażał on relację między obrazem radarowym a średnicą koron drzew. W niektórych przypadkach współczynniki korelacji rosły przy ograniczeniu analizowanej populacji do terenów oświetlonych wiązką promieniowania radarowego. W ten sposób osiągnięto poprawę prawie wszystkich zależności. Jednakże związki te są wyraźne jedynie w przypadku średnicy koron drzew i pierśnicy ($r = 0.76$), wysokości drzew (0.72), wieku (0.61) i długości korony (0.54), a więc cech mających wpływ na szorstkość powierzchni koron.

Tablica 4

Współczynniki korelacji wskaźnika σ , zarejestrowanego przez satelitę ERS-1, z terenowymi charakterystykami drzewostanów

Parametr	D-stany świerkowe	D-stany świerkowe na wystawach NE,E,SE	D-stany świerkowe o $Z_w > 0.8$	D-stany świerkowe, $Z_w > 0.8$, wystawy NE,E,SE
Wiek	0.14	-0.61	0.15	0.55
$D_{1,3}$	0.20	0.76	0.33	0.71
H	0.09	0.72	0.21	0.68
H_k	0.03	0.54	0.08	0.42
\emptyset_k	0.31	0.76	0.36	0.64
L_k	0.17	0.37	0.27	0.52
N	-0.02	0.16	-0.02	0.13
NM_o	0.09	-0.06	0.11	0.08
NM_p	0.06	-0.06	0.06	-0.09
Df	0.04	0.32	0.11	0.32
Dc	-0.06	-0.22	0.07	0.12
Dm	0.08	0.36	0.18	0.49
Nachylenie stoku	-0.13	-0.12	-0.03	0.31
Zwarcie	0.20	-0.57	-	-

W kolejnych badaniach obejmujących populację drzewostanów świerkowych o zwarciu pełnym najsilniejszy związek stwierdzono ze średnicą koron drzew (0.36) i pierśnicą (0.33). I tutaj ograniczenie populacji do wystaw NE, E i SE powoduje wzrost siły związku odnośnie do szeregu parametrów, takich jak: pierśnica, wysokość drzew, średnica koron, wiek, długość korony, defoliacja i wskaźnik uszkodzeń, przy najwyższym współczynniku korelacji dla pierśnicy drzew, wynoszącym 0.71. Warto też odnotować wzrost związku współczynnika wstecznego odbicia z nachyleniem stoku, przy ograniczeniu analiz do stoków oświetlonych, co świadczy, że wartości natężenia odbitego promieniowania mikrofalowego zależy od kąta padania promieni radarowych.

Dla wybranych drzewostanów świerkowych próbowano znaleźć relacje pomiędzy współczynnikiem wstecznego odbicia a wskaźnikami powierzchni projekcyjnej igieł (LAI-Leaf Area Index) oraz średnim kątem nachylenia igieł (MTA-Mean Tip Angle). Dane do tych analiz zaczerpnięto z pomiarów LAI i MTA, wykonanych w Sudetach urządzeniem LAI-2000 Plant Canopy Analyser firmy LI-COR (Zawila-Niedźwiecki i in., 1993). Nie stwierdzono jednak związku między współczynnikiem wstecznego odbicia a LAI ($r=0.08$), zauważono natomiast, że zarysowuje się silniejsza relacja z MTA ($r=0.43$), choć i ona jest jeszcze zbyt słaba, aby można było wyciągać daleko idące wnioski.

Oprócz korelacji prostych szukano zależności wielu zmiennych pomiędzy echem rejestrowanym przez SAR, a parametrami drzewostanów. Najwyższe korelacje osiągnięto dla zwartych drzewostanów świerkowych, porastających stoki NE, E i SE, a otrzymane formuły mają postać:

$$\begin{array}{ll} \text{(I)} & \sigma^{\circ} = 17.33 - 0.07 \text{Wiek} + 0.34 D_{1,3} + 0.75 \varnothing_K & R_a^2=0.83 \\ \text{(II)} & \sigma^{\circ} = 13.35 + 0.33 D_{1,3} - 0.07 N + 0.71 NM_G & R_a^2=0.64 \\ \text{(III)} & \sigma^{\circ} = 3.99 + 1.11 \varnothing_K - 0.09 N + 7.6 Dm & R_a^2=0.62 \end{array}$$

Tak więc duża część zmienności współczynnika wstecznego odbicia może być wyjaśniona zmiennością wieku drzewostanów, pierśnicy, średnicy koron, liczby drzew na jednostkę powierzchni, liczby drzew martwych w drzewostanie głównym oraz kondycji drzew opisywanej wskaźnikiem uszkodzeń drzewostanów.

Duże deniwelacje terenu na obszarze Karkonoszy utrudniają analizowanie zdjęć mikrofalowych, gdyż wiele drzewostanów znajduje się w cieniu lub półcieniu wiązki radarowej, co wpływa na pogorszenie wyników korelacji. Jednakże, w związku z poprawą wyników po zawężeniu analiz do stoków NE, E i SE, można sądzić, że - aby określić relację pomiędzy parametrami drzewostanów, a ich charakterystykami spektralnymi - optymalne byłoby analizowanie tylko drzewostanów najlepiej oświetlonych przez radar satelity, czyli zlokalizowanych na wystawach wschodnich (E). Niestety w omawianym przypadku było to niemożliwe, gdyż analizowano by wówczas próbę liczebnie zbyt małą.

Część prac analitycznych na zdjęciach mikrofalowych z obszaru Sudetów polegała na wizualnej interpretacji i porównywaniu wyników z mapami

drzewostanowymi i zdjęciami lotniczymi. Podczas wizualnej interpretacji mikrofalowych zdjęć satelitarnych stwierdzono, że plamistość, charakteryzująca zdjęcia radarowe (zwana "efektem soli i pieprzu") oraz mały zakres zróżnicowania promieniowania mikrofalowego bardzo utrudnia analizę pojedynczych zdjęć. Dlatego analizie wizualnej poddano kompozycje barwne, utworzone ze zdjęć wykonanych w różnych terminach. Taka kompozycja dostarcza wielu interesujących informacji niemożliwych do wydobycia z pojedynczych zdjęć. W przypadku obszaru Sudetów, w celu sporządzenia kompozycji barwnej wykorzystano zdjęcia wykonane 24 października 1992, 3 grudnia 1992 oraz 6 kwietnia 1993 r., naświetlając je odpowiednio barwami: zieloną, niebieską i czerwoną. Dzięki temu lasy zostały odwzorowane w różnych odcieniach zieleni, co ułatwiło interpretację.

Nierównomierna pokrywa śniegu zobrazowana na zdjęciu grudniowym utrudniła rozpoznanie poszczególnych obiektów. Utrudnienie to nie występuje w przypadku interpretacji kompozycji barwnej. Wręcz przeciwnie, obraz śniegu na jednym ze zdjęć zwiększył czytelność różnych obiektów na kompozycji barwnej.

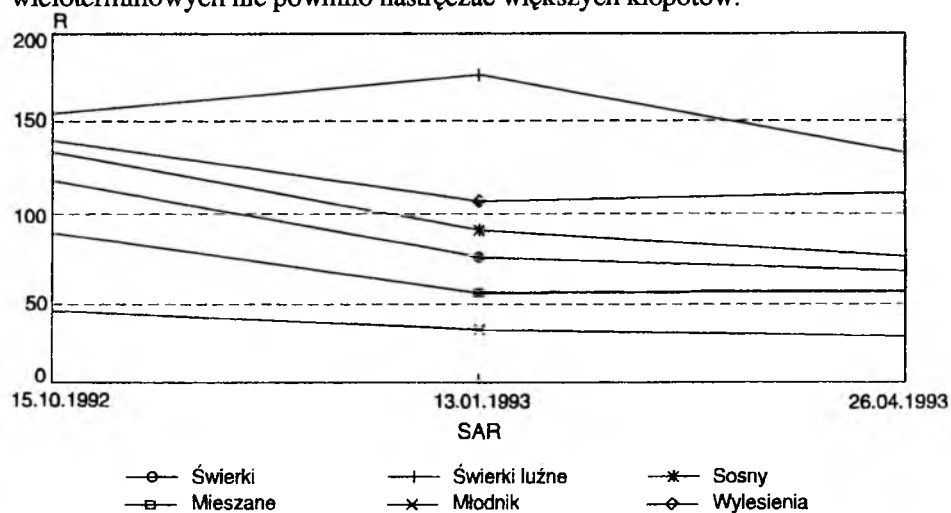
Poszczególne elementy kompozycji powinny więc zawierać jak najwięcej uzupełniających się informacji, a zatem powinny maksymalnie różnić się między sobą. To właśnie miało miejsce w omawianym przypadku, gdy w skład kompozycji barwnej weszły trzy zdjęcia ERS-1, wykonane w różnych porach roku (wczesna jesień, zima i wiosna). Wyniki analiz wykazują, że na zdjęciach ERS-1 można wydzielić drzewostany starszych klas wieku, młodniki oraz zręby i wylesienia, a także silne rozluźnienia zwarcia. Wyraźnie widoczna jest granica polno-leśna. Natomiast nie udaje się stratyfikować drzewostanów o różnym składzie gatunkowym. Ponadto interpretacja piętra kosówki, muraw wysokogórskich i nagich skał, w związku z ukształtowaniem terenu i silnym echem radarowym od skał i kosodrzewiny, nastręcza wiele trudności i niejednokrotnie wręcz uniemożliwia rozróżnienie tych obiektów. Na obszarze płaskim trudności te nie występują i tutaj interpretacja kompozycji barwnej jest stosunkowo łatwa.

Można stwierdzić, że podobnie jak w przypadku interpretacji zdjęć wykonanych w zakresach optycznych, wizualna analiza zdjęć radarowych daje dokładniejsze wyniki rozpoznawania i precyzyjnej lokalizacji różnych obiektów. Niemniej jednak w prezentowanych badaniach testowano także możliwość wykonywania klasyfikacji z wykorzystaniem systemów komputerowych. Przykładowe charakterystyki spektralne nieprzetworzonego obrazu SAR, zamieszczone w tablicy 5 oraz na rys. 13 i 14, a otrzymane ze zdjęć ERS-1 wykonanych w różnych terminach, wykazują znaczne rozpiętości rejestrowanych wartości dla poszczególnych klas. Związane jest to z obecnością śniegu i różną wilgotnością podłoża w poszczególnych porach roku (sucho we wrześniu 1992, śnieg w grudniu 1992 i mokro w kwietniu 1993).

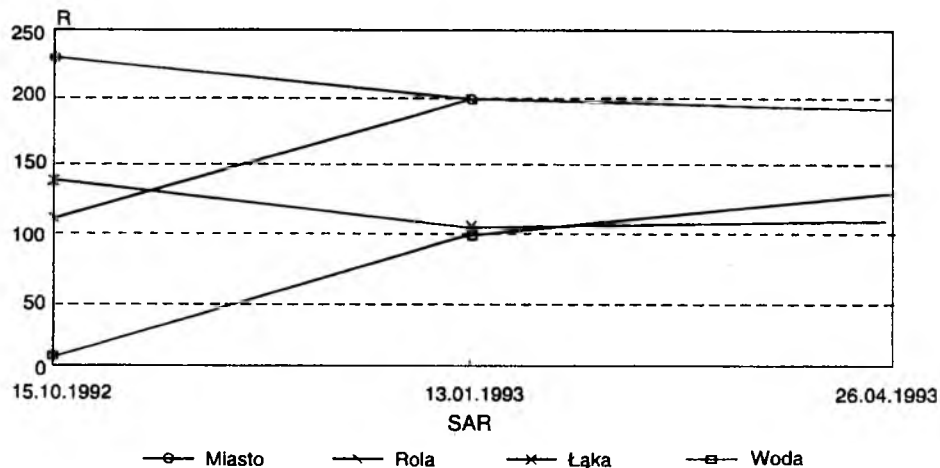
Tablica 5
Wartości σ dla przykładowych klas interpretacyjnych (wartości średnie, a w nawiasach odchylenia standardowe)

Klasa	ERS-1 z 15.10.1992	ERS-1 z 13.01.1993	ERS-1 z 26.04.1993
D-stany świerkowe	118 (54)	76 (43)	68 (38)
D-stany świerkowe luźne	152 (64)	176 (67)	134 (66)
D-stany sosnowe	133 (56)	91 (47)	76 (40)
D-stany mieszane	89 (45)	55 (36)	56 (35)
Młodniki	47 (28)	35 (28)	33 (28)
Wylesienia z trawą	140 (61)	106 (53)	111 (59)
Tereny rolnicze	106 (47)	198 (59)	191 (59)
Tereny zurbanizowane	228 (50)	199 (67)	191 (71)
Wody	6 (18)	101 (49)	129 (56)

Z analizy rysunków 13 i 14 wynika, że wartości odpowiedzi spektralnych analizowanych obiektów, praktycznie biorąc uniemożliwiają rozróżnienie składu gatunkowego drzewostanów. Drzewostany świerkowe, sosnowe i mieszane wykazują zbliżone charakterystyki, a ich wartości zmieniają się wraz ze zmianą pór roku. Natomiast istnieje możliwość wydzielenia na zdjęciach SAR młodników oraz zrębów i wylesień. Ich rozróżnienie na pojedynczych zdjęciach może być niekiedy utrudnione, ale na kompozycji barwnej sporządzonej ze zdjęć wieloterminowych nie powinno nastęrczać większych kłopotów.



Rys. 13. Charakterystyki spektralne SAR dla wybranych klas leśnych



Rys. 14 Charakterystyki spektralne SAR dla wybranych klas nieleśnych

Pokrywa śniegu i lodu wyraźnie zmienia wartość echa radaru, co jest szczególnie zauważalne w przypadku wody i drzewostanów o luźnym zwarcie oraz terenów rolniczych, na których odpowiedź spektralna na zdjęciu grudniowym jest wyższa niż na wrześniowym. Natomiast wpływ wilgoci na charakterystyki spektralne jest widoczny na obszarach wylesień trawiastych, dla których odpowiedzi spektralne na zdjęciach grudniowym i kwietniowym (duża wilgotność) są niższe niż na zdjęciu wrześniowym. Podobną sytuację obserwujemy w przypadku drzewostanów świerkowych i sosnowych. Z kolei różnice w odpowiedziach spektralnych drzewostanów mieszanych (bukowo-świerkowych) zobrazowanych w różnych terminach, mogą być także związane z obecnością lub brakiem liści w różnych fazach fenologicznych.

Na każdym zdjęciu średnie wartości dla poszczególnych klas są wyraźnie zróżnicowane. Niestety wysokie wartości odchyłeń standardowych, wynikające z plamistości obrazu, którą traktuje się jako zmienną losową, utrudniają cyfrowe klasyfikowanie zdjęć wykonanych przez satelitę ERS-1. Przy takim rozkładzie wartości w poszczególnych klasach należy się liczyć z koniecznością ograniczania klasyfikacji numerycznych do jak najbardziej homogenicznych obszarów, poprzez wykorzystywanie masek. Maski takie zasłaniają np. obszary rolnicze i zurbanizowane, gdy klasyfikuje się tereny leśne, a następnie, o ile zachodzi taka potrzeba, po zamaskowaniu już sklasyfikowanych lasów, prowadzi się interpretację cyfrową obszaru rolniczego.

Dla przykładu można podać, że klasyfikując omawiane tutaj zdjęcia i wydzielając na nich 8 klas (drzewostany świerkowe zwarte i luźne, sosnowe, mieszane, młodniki, a także obszary rolne, zurbanizowane i wody) osiągnięto średnią dokładność klasyfikacji rzędu 52%. Po ograniczeniu obszaru opracowania do młodników i drzewostanów świerkowych, terenów rolnych i wód, dokładność klasyfikacji wzrosła do 83%. Podobną dokładność (84%) otrzymano klasyfikując

tylko młodniki, drzewostany świerkowe i tereny rolnicze. Natomiast uwzględniając jedynie młodniki, drzewostany świerkowe oraz wody, osiągnięto średnią dokładność rzędu 90%. Takie podejście wymaga stosowania systemu informacji przestrzennej (SIP), w którym muszą się znajdować obrazowe warstwy informacyjne, charakteryzujące formy użytkowania ziemi lub, w przypadku lasów, określające ich zasięg.

Należy podkreślić, że bezpośrednia analiza zdjęcia ERS-1 z obszaru górskiego, bez pomocy NMT, jest niezwykle trudna i wymaga dobrej znajomości obiektu badań. Dystorsja obrazu oraz cień stanowią dużą przeszkodę w interpretacji zdjęcia i znacznie utrudniają wykonywanie klasyfikacji cyfrowych. Podczas interpretacji stwierdzono użyteczność filtracji niskich częstotliwości przestrzennych oraz segmentacji obrazu, dzięki którym następuje zredukowanie plamistości i uwypuklenie wielu elementów terenowych.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, że mikrofalowe zdjęcia, wykonywane przez satelitę ERS-1, mogą znaleźć zastosowanie jedynie jako uzupełniające źródło informacji o stanie lasów. Ich głównym atutem jest, oczywiście, możliwość rejestracji obrazu powierzchni ziemi niezależnie od warunków pogodowych. Przedstawione powyżej analizy wskazują, że na wartość odbicia promieniowania mikrofalowego, wysyłanego przez ERS-1, od drzewostanów mają wpływ: kąt padania promieniowania, wiek drzewostanu, pierśnica, średnica koron, liczba drzew na jednostkę powierzchni, liczba drzew martwych i zamierających w drzewostanie głównym, a także kondycja drzew opisywana ubytkiem aparatu asymilacyjnego i zahamowaniem przyrostu.

Zastosowanie kompozycji barwnych zdjęć radarowych, utworzonych ze zdjęć wieloterminowych umożliwia jedynie wydzielenie drzewostanów zwartych, silnie rozluźnionych, młodników oraz zrębów i wylesień.

6. OCENA STANU LASU W SUDETACH ZACHODNICH NA PODSTAWIE ZDJĘĆ SATELITARNYCH

Wykorzystywanie zdjęć satelitarnych w monitorowaniu lasu wymaga stałej aktualizacji zarówno materiałów wyjściowych, jak i wyników interpretacji zdjęć oraz integracji zgromadzonych danych przestrzennych i opisowych. W omawianej pracy korzystano z aktualnych danych inwentaryzacyjnych (opisanych w rozdz. 3), a bazowe mapy leśne opracowano na podkładzie map topograficznych w skali 1:25 000, w odwzorowaniu GUGiK 1965, z dodatkowo naniesioną siatką współrzędnych układu 1942. Mapy te były ponadto weryfikowane i unaczęsniane podczas interpretacji zdjęć lotniczych. Dotyczyło to szczególnie granicy polno-leśnej, której przebieg na mapach leśnych często nie odpowiadał stanowi faktycznemu. Dzięki temu dysponowano wiarygodnymi informacjami referencyjnymi, mogącymi służyć jako odniesienie przy weryfikacji wyników analiz zdjęć satelitarnych.

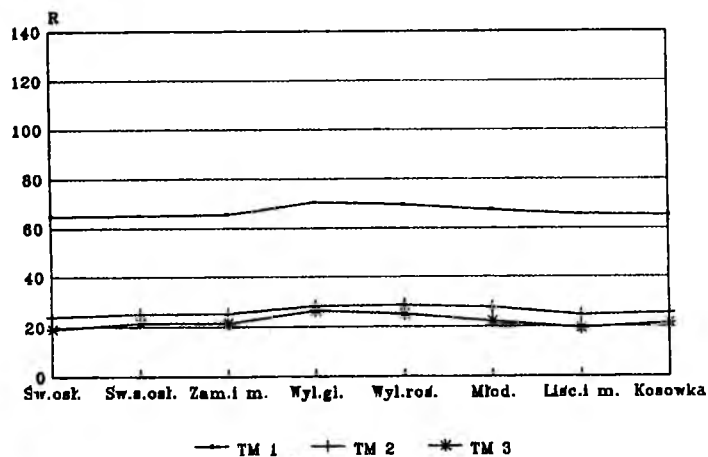
Weryfikacji wyników analiz zdjęć satelitarnych Thematic Mapper dokonywano sukcesywnie podczas kolejnych etapów prac i obejmowały one:

- kontrolę spektralnego rozróżniania klas,
- kontrolę prawidłowości wyboru powierzchni treningowych w procesie klasyfikacji zdjęć,
- kontrolę dokładności klasyfikacji,
- analizę wyników klasyfikacji.

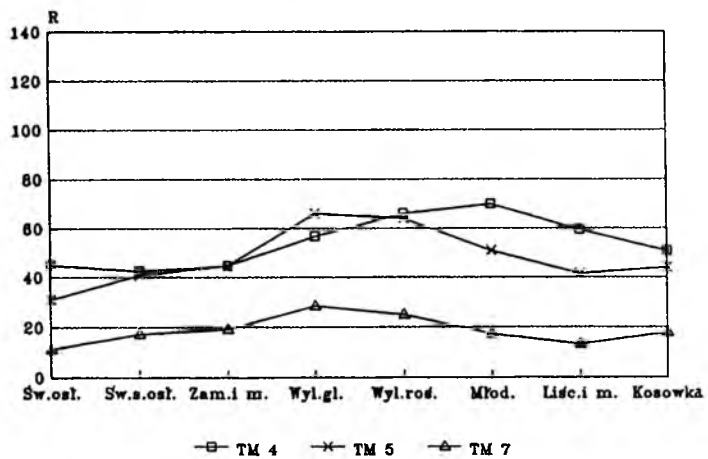
Klasyfikacja zdjęć satelitarnych jest procesem interaktywnym, w którym metodą kolejnych iteracji dokonuje się między innymi wyboru liczby wydzielonych klas interpretacyjnych. O możliwości wyróżnienia poszczególnych klas decyduje ich spektralna odrębność. Na rysunkach 15-18 przedstawiono charakterystyki spektralne klas interpretacyjnych wydzielonych w niniejszej pracy. Widać na nich wyraźnie, że w pojedynczych zakresach TM występuje zbieżność odpowiedzi spektralnych poszczególnych klas. Dlatego też niezwykle ważne jest wykonywanie klasyfikacji obrazu wielokanałowego, a szczególnie obrazów wagowanych, co umożliwi wiarygodne rozgraniczenie poszczególnych klas interpretacyjnych. Wagowanie odpowiedzi spektralnych jest szczególnie użyteczną operacją, dzięki której uzyskuje się wyraźne zróżnicowanie poszczególnych obszarów leśnych, charakteryzujących się zróżnicowaniem biomasy igieł i uszkodzeń (rys. 16). Jednakże ze względu na występowanie na obrazie pikseli mieszanych (*mikseli*), nigdy nie uzyska się pełnej rozdzielności spektralnej poszczególnych klas. W takim przypadku zachodzenia na siebie dwóch lub więcej klas interpretacyjnych, w procesie przyporządkowywania mikseli do poszczególnych klas interpretacyjnych, zastosowano metodę największego prawdopodobieństwa. Metoda ta bazuje na analizie odległości spektralnej i przestrzennej danego piksela od środka klastrów reprezentujących konkretne klasy wydzielane na zdjęciu.

Napotymano także trudność przy próbach rozdzielenia na zdjęciu satelitarnym drzewostanów liściastych od młodników, co wynika z faktu podobieństwa spektralnego (duża ilość chlorofilu) zwartych młodników świerkowych i drzewostanów liściastych w pełni okresu wegetacyjnego. Precyzyjne rozdzielanie tych klas może nastąpić dzięki porównywaniu zdjęć wykonanych w różnych okresach fenologicznych.

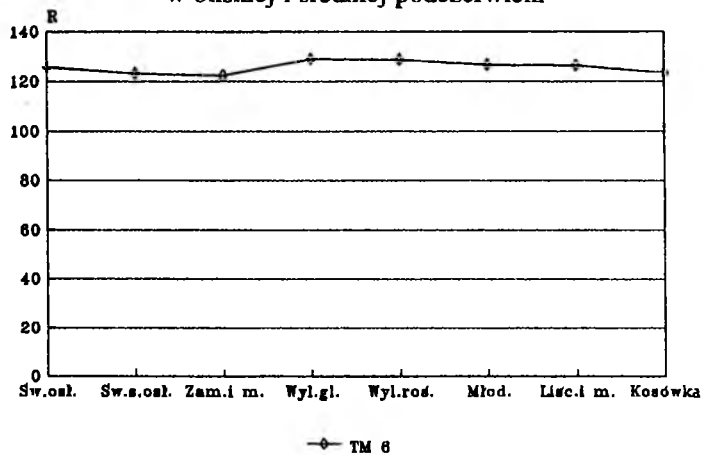
W drugim etapie weryfikacji wyników interpretacji zdjęć satelitarnych dokonano kontroli prawidłowości wyboru powierzchni treningowych, mających służyć za wzorce do klasyfikacji nadzorowanej. Ten etap weryfikacji jest zwany kontrolą dokładności przedklasyfikacyjnej. Przeprowadza się ją poprzez wstępną klasyfikację obszarów objętych polami treningowymi, które w zasadzie powinny objąć 5% pikseli interpretowanego zdjęcia. Wyniki takiej kontroli analizowanego w tej pracy zdjęcia TM przedstawia tabl. 6. Wynika z niej, że średnia dokładność przedklasyfikacyjna wydzielenia 7 klas interpretacyjnych wynosi 94%, przy czym sześć klas zostało zlokalizowanych z dokładnością powyżej 90%. Jedynie młodniki



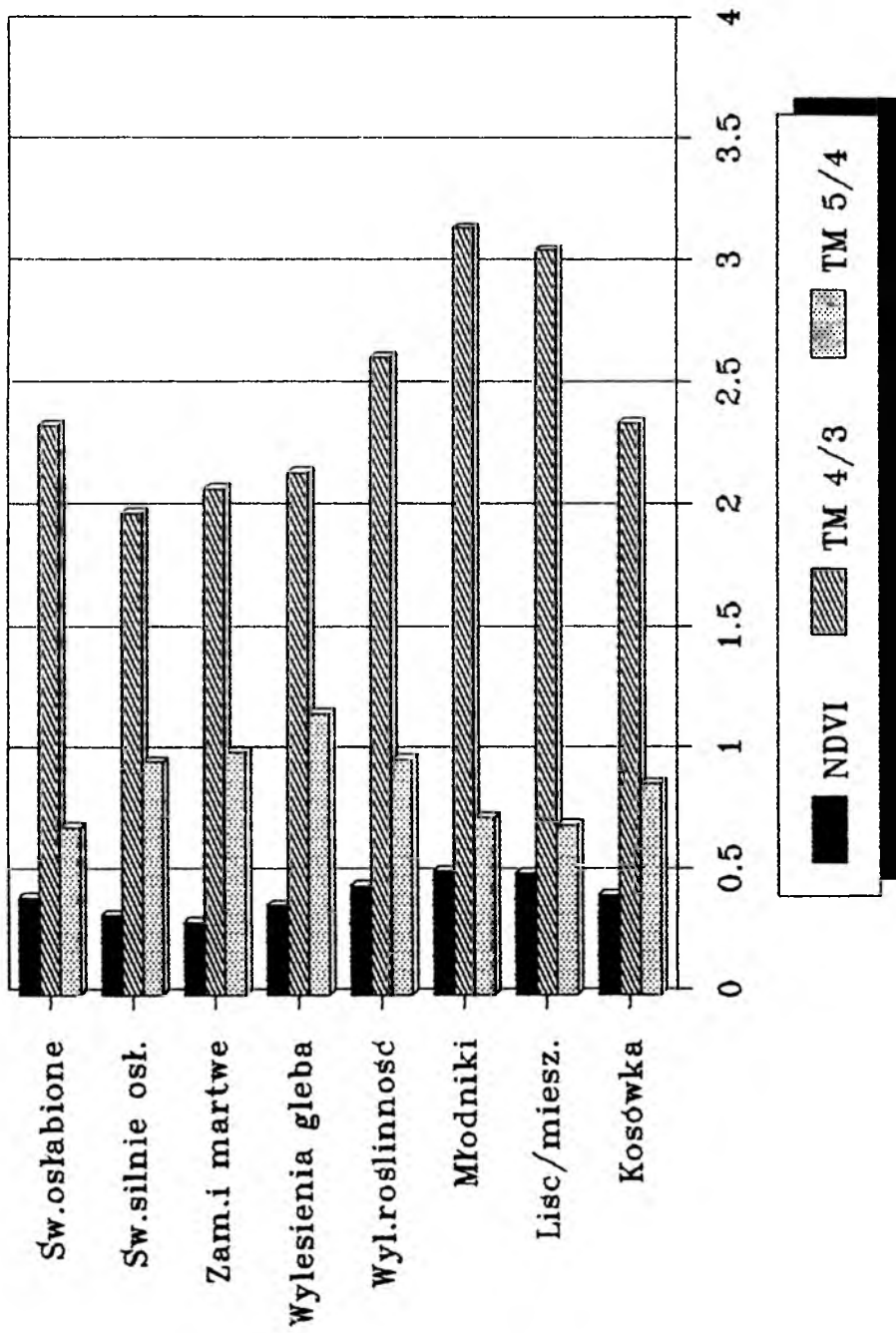
Rys. 15. Charakterystyka spektralna klas interpretacyjnych w widmie widzialnym



Rys. 16. Charakterystyka spektralna klas interpretacyjnych w bliskiej i średniej podczerwieni



Rys. 17. Charakterystyka spektralna klas interpretacyjnych w dalekiej podczerwieni



Rys. 18. Wskaźniki roślinności (NDVI), uszkodzeń (TM 5/4) i biomasy (TM 4/3) dla poszczególnych klas interpretacyjnych

Tablica 6

Dokładność lokalizacji powierzchni treningowych

Klasa	Świerki osłabione	Świerki silnie osłabione	Zamierające i mieszane	Młodniki	Wylesienia z roślinnością	Wylesienia z odkrytą glebą	Liściaste i mieszane
Świerki osłabione	96.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Świerki silnie osłabione	3.3	97.2	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Zamierające i mieszane	0.7	2.1	96.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Młodniki	0.0	0.7	0.0	84.8	3.2	0.0	7.7
Wylesienia z roślinnością	0.0	0.0	0.0	10.9	96.7	4.7	0.4
Wylesienia z odkrytą glebą	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	95.3	0.0
Liściaste i mieszane	0.0	0.0	0.0	4.3	0.6	0.0	91.9

zlokalizowano z dokładnością niespełna 85%, przy czym prawie 11% tej klasy zostało zaliczonych do wylesień z pokrywą roślinną. Generalnie można stwierdzić, że powierzchnie treningowe zostały dobrze wybrane i precyzyjnie zlokalizowane ze średnią dokładnością 94%, a klasyfikacja pól treningowych reprezentujących trzy klasy kondycji drzewostanów osiąga nawet średnią dokładność 97%.

Przedstawiona powyżej analiza dokładności przedklasyfikacyjnej upoważniła do wykorzystania zdefiniowanych uprzednio pól treningowych do przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej. Wyniki kontroli dokładności tej klasyfikacji przedstawia tabl. 7. Wynika z niej że z największą dokładnością sklasyfikowano drzewostany zamierające i martwe oraz wylesienia z pokrywą roślinną. Stosunkowo mały błąd klasyfikacji dotyczy także wyróżniania drzewostanów osłabionych i silnie osłabionych, przy wzajemnym przenikaniu się tych klas, rzędu 10%. Niewielki obszar (ok. 4%) drzewostanów silnie osłabionych został zaliczony do klasy drzewostanów zamierających i martwych. Z dużym prawdopodobieństwem (przekraczającym 80%) są sklasyfikowane drzewostany liściaste i mieszane, jednakże część ich została zaliczona do innych klas (drzewostany świerkowe silnie osłabione, młodniki i wylesienia z pokrywą roślinną), co jest wynikiem podobieństw spektralnych pewnych form tych klas terenowych. Istnieje ponadto zauważalne przenikanie klas: wylesienia z pokrywą roślinną i wylesienia z odkrytą glebą. Aż 28% wylesień z odkrytą glebą zostało zaliczonych do wylesień z pokrywą roślinną. Jest to wynikiem mieszania się odpowiedzi spektralnych (mikseli) wzdłuż nieregularnej granicy trawa/gleba. Najmniejszą dokładność

Tablica 7

Dokładność klasyfikacji zdjęć satelitarnych TM

Klasa	Świerki osłabione	Świerki silnie osłabione	Zamierające i mieszane	Młodniki	Wylesienia z roślinnością	Wylesienia z odkrytą glebą
Świerki osłabione	88.1	11.2	0.3	0.0	0.0	0.0
Świerki silnie osłabione	8.9	83.3	0.0	0.5	0.0	10.3
Zamierające i mieszane	3.0	4.4	99.7	1.4	0.3	0.0
Młodniki	0.0	0.9	0.0	63.5	0.3	6.3
Wylesienia z roślinnością	0.0	0.0	0.0	3.4	28.7	2.6
Wylesienia z odkrytą glebą	0.0	0.0	0.0	0.0	70.7	0.0
Liściaste i mieszane	0.0	0.2	0.0	31.2	0.0	80.8

klasyfikacji można uzyskać w odniesieniu do młodników, których odpowiedź spektralna powoduje, że częściowo zostały one zaliczone do klasy drzewostanów liściastych i mieszanych (aż 31%), a także do klasy wylesień z pokrywą roślinną.

Cała klasyfikacja została wykonana ze średnią dokładnością rzędu 83%, co w przypadku tak dużej ilości wydzielonych klas (7 klas) należy uznać za wynik zadowalający. Tym bardziej że stratyfikacja drzewostanów świerkowych, co było głównym celem tej pracy, została wykonana ze średnią dokładnością powyżej 90%.

Ostatnim etapem weryfikacji wyników interpretacji zdjęć satelitarnych jest analiza powierzchniowych statystyk poklasyfikacyjnych. Statystyki te, przedstawione w tablicy 2, omówiono w rozdziale 5.2.1. Porównanie lokalizacji klas interpretacyjnych na obrazie poklasyfikacyjnym z wynikami interpretacji zdjęć lotniczych wykazuje zbieżność obu opracowań.

Podsumowując wyniki powyższych weryfikacji należy stwierdzić, że zdjęcia satelitarne nadają się do wielkoobszarowych (mało i średnioskalowych) inwentaryzacji stanu lasów oraz stratyfikacji kondycji uszkodzonych drzewostanów świerkowych. Zdjęcia satelitarne mogą być więc użytecznym źródłem danych monitoringowych dotyczących wielkoobszarowej oceny stanu lasu w ekosystemach zagrożonych.

7. INTEGRACJA W SYSTEMIE INFORMACJI PRZESTRZENNEJ WIELOŹRÓDŁOWYCH DANYCH W CELU KOMPLEKSOWEJ ANALIZY STANU LASU W SUDETACH ZACHODNICH

Wyniki badań zrelacjonowanych w poprzednich rozdziałach pozwoliły sprecyzować metodę oceny stanu lasu przy wykorzystaniu informacji dostarczonych przez zdjęcia satelitarne. Przedstawiony na rys. 19 schemat tej metody pokazuje, że do oceny stanu lasu z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych należy wykorzystywać wieloźródłowe dane opisujące stan lasu, które gromadzone są w systemie informacji przestrzennej (SIP).

System informacji przestrzennej jest to komputerowy system gromadzenia, przetwarzania i udostępniania informacji zlokalizowanych w przestrzeni geograficznej. Według Gaździckiego (1990), informacje przestrzenne są to informacje o położeniu, geometrycznych własnościach i przestrzennych relacjach obiektów, które mogą być identyfikowane w odniesieniu do Ziemi. Dzieli on systemy informacji przestrzennej na małoskalowe systemy informacji geograficznej (SIG) i wielkoskalowe systemy informacji o terenie (SIT).

Wśród systemów informacji terenowej można wyróżnić: systemy katastralne, informacji przyrodniczej i informacji o infrastrukturze. Systemy informacji geograficznej zawierają w sobie także informacje społeczno-gospodarcze.

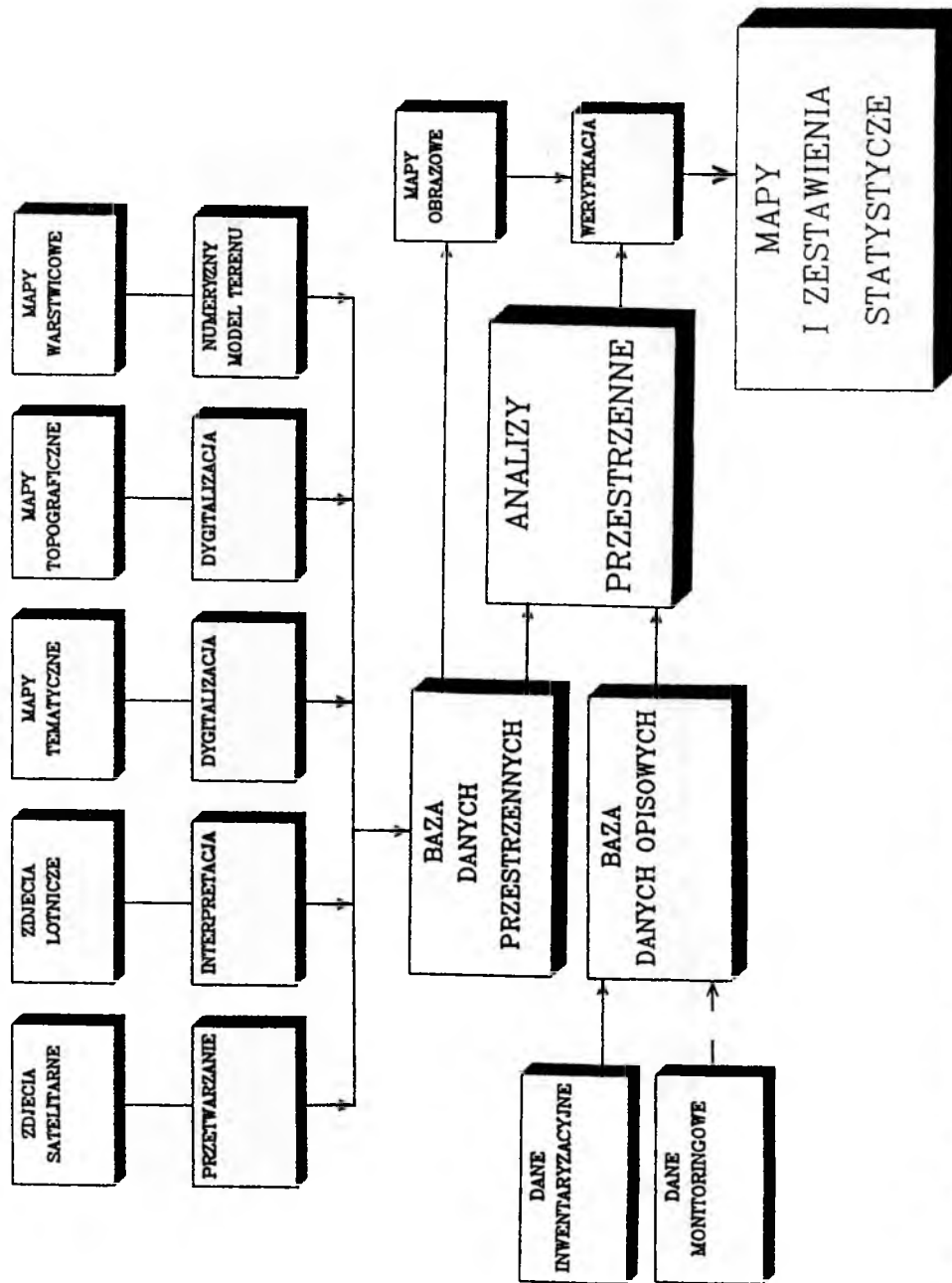
SIP jest środkiem ułatwiającym podejmowanie decyzji o charakterze prawnym, administracyjnym i gospodarczym oraz pomocą w planowaniu. Tworzy go baza danych utworzona dla określonego obszaru oraz zbiór metod i technik systematycznego zbierania, aktualizowania, przetwarzania i analizowania tych danych.

Koncepcja systemów informacji geograficznej powstała w Kanadzie na początku lat 1960. Początkowo miał on na celu wspomóc zarządzanie informacjami o zasobach naturalnych i środowisku, ale wkrótce uzyskał uznanie także w innych dziedzinach, a szczególnie w urbanistyce i planowaniu przestrzennym. Ciągle jednak leśnictwo i zarządzanie zasobami naturalnymi są głównymi użytkownikami SIP (Frączek i in., 1992).

SIP są narzędziem przedstawiania modelu świata, obejmującym dane przestrzenne i opisowe. Dane przestrzenne ukazują położenie, kształt i wzajemne relacje pomiędzy obiektami, podczas gdy dane opisowe dotyczą charakterystyk tych obiektów (np. opisy taksacyjne drzewostanów, dane monitoringowe, rejestry czynności gospodarczych, czy rejestry kosztów odniesione do konkretnych drzewostanów lub jednostek administracyjnych).

Informacje przestrzenne mogą być wykorzystywane poprzez:

- prezentację zjawisk, ich opisanie, klasyfikację, wartościowanie,
- lokalizację zjawisk w przestrzeni geograficznej,
- prezentację zmienności zjawisk w czasie.



Rys. 19. Schemat metody oceny stanu lasu z wykorzystaniem teledetekcji i systemu informacji przestrzennej

Informacje te mogą być zapisane w dwóch postaciach: wektorowej (elementy graficzne, takie jak: punkty, linie, poligony) lub rastrowej (piksel, siatka kwadratów). Wektorowe gromadzenie i prezentacja są efektywniejsze, gdy cechy przestrzenne są zdefiniowane jako elementy graficzne ze ścisłymi granicami (granice własności, linie podziału przestrzennego, sieć drogowa, granice poszczególnych zjawisk przyrodniczych itp).

W przypadku danych opierających się na informacjach teledetekcyjnych korzysta się przeważnie z rastrowego gromadzenia danych, co wynika z pikselowej struktury zdjęć satelitarnych, a niekiedy także i lotniczych. Konwersja danych wektorowych na rastrowe umożliwia pełne wykorzystanie danych zapisanych w obu postaciach w różnego rodzaju analizach przestrzennych.

W zależności od potrzeb i możliwości systemów informacji przestrzennej można w nich gromadzić informacje z istniejących map, danych teledetekcyjnych, istniejących baz danych, wyników taksacji i pomiarów terenowych. Bazy danych są najdroższym i wymagającym największych nakładów pracy elementem SIP, ale też są one jego główną częścią (Olenderek i Korpetta, 1992).

Produkowane w świecie uniwersalne systemy informacji przestrzennej mogą być łatwo zaadaptowane do różnych wymagań sprzętowych użytkowników, zapewniając możliwość integracji z już istniejącymi modelami i bazami danych, a także mają możliwość komunikacji międzysystemowych. Umożliwia to wykorzystanie międzynarodowych doświadczeń i standardów oraz zapewnia realizację rosnących potrzeb stosowania SIP, przy zapewnieniu zgodności, a więc i porównywalności z bazami danych i wynikami analiz prowadzonymi w różnych ośrodkach.

Leśne systemy informacji geograficznej gromadzą informacje o środowisku w dwóch, powiązanych ze sobą bazach danych: przestrzennych i opisowych.

Baza danych przestrzennych zawiera nie tylko informacje wydobyte ze zdjęć satelitarnych, ale także wyniki interpretacji zdjęć lotniczych, dane zdigitalizowane z map topograficznych i tematycznych oraz numeryczny model terenu. Zdjęcia lotnicze i mapy dostarczały informacji referencyjnych niezbędnych do prawidłowej klasyfikacji zdjęć satelitarnych. Natomiast numeryczny model terenu był przydatny ze względu na duże deniwelacje terenu na obszarze Sudetów.

Baza danych opisowych jest tworzona z informacji inwentaryzacyjnych urzędania lasu, danych opisowych oraz opisów sporządzanych w ramach badania poszczególnych obszarów leśnych. Wszystkie te opisy są powiązane z informacjami przestrzennymi poprzez odniesienia do konkretnych drzewostanów, oddziałów i jednostek administracyjnych leśnictwa.

W niniejszej pracy do oceny stanu lasu w zagrożonych ekosystemach Sudetów zastosowano system INTERGRAPH (Huntsville, Al), którego ogromną zaletą jest efektowna grafika oraz łatwość obsługi. Bazuje on na komputerach wytwarzanych przez firmę INTERGRAPH, a niektóre moduły mogą pracować także na innych platformach i komputerach klasy PC. System ten posiada

znakomity moduł przetwarzania obrazowego i zapewnia pełny ciąg technologiczny od dygitalizacji, przez analitykę (pełna konwersja wektor-raster i raster-wektor), po edycję i druk map.

System informacji geograficznej Sudetów Zachodnich umożliwił sporządzanie map obrazowych oraz dokonywanie analiz przestrzennych, uwzględniających wieloźródłowe i wieloterminowe dane o stanie lasu, w tym dane otrzymane w toku analizy zdjęć satelitarnych.

W trakcie realizacji badań do baz danych tego systemu wprowadzono wymienione niżej dane, tworząc warstwy informacyjne:

1. Do bazy danych przestrzennych wprowadzono:

- numeryczny model terenu (NMT) - sporządzony na podstawie zeskanowanych map warstwicznych w skali 1:25 000,

- charakterystykę kondycji lasu w 1984 r. - opracowaną na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych wykonanych w 1984 r. W charakterystyce tej przedstawiono zasięgi następujących klas wyróżnionych w toku interpretacji tych zdjęć:

- drzewostany świerkowe osłabione,
- drzewostany świerkowe silnie osłabione,
- drzewostany świerkowe zamierające,
- drzewostany martwe,
- drzewostany liściaste i mieszane,
- odnowienia i zalesienia,
- wylesienia,
- kosodrzewina,
- inne,
- drzewostany o rozluźnionym zwarciu ocenionym na podstawie ich obrazu na zdjęciach lotniczych
- hydrografię
 - ciekł wodne,
 - wody stojące,
- sieć transportowa
 - drogi państwowe,
 - drogi lokalne,
 - drogi leśne,
 - koleje,
- jednostki administracyjne:
 - granice nadleśnictw i parków narodowych,
 - granice obrębów,
 - linie oddziałowe i ostępowe,
 - granice drzewostanów,
- wyniki analiz zdjęć satelitarnych.

2. Do bazy danych opisowych - dane inwentaryzacyjne i monitoringowe.

Organizacja obydwu baz danych umożliwia dodawanie do nich dowolnych informacji, które mogą być przydatne podczas przeprowadzania analiz przestrzennych.

Analizowane warstwy informacyjne utworzone na podstawie map leśnych, topograficznych i zdjęć satelitarnych obejmują obszar 19634 ha należący do Karkonoskiego Parku Narodowego oraz obrębów: Świeradów, Szklarska Poręba, Piechowice i Śnieżka.

Analizy danych zgromadzonych w opracowanym systemie informacji przestrzennej pozwoliły określić przestrzenny rozkład różnych klas wydzielonych w lasach Sudetów Zachodnich oraz na podstawie zdjęć satelitarnych prześledzić zmienność stanu lasu w latach 1984-1990. Umożliwiło to wydzielenie na obszarze badań trzech regionów, które charakteryzują się różnym stopniem degradacji lasu. Są to:

- obszar zachodni pokrywający wschodnią część obrębu Świeradów, obręb Szklarska Poręba i północny kompleks obrębu Piechowice (6 264ha),
- obszar południowy obejmujący całość Karkonoskiego Parku Narodowego (5557 ha),
- obszar centralny obejmujący obręb Śnieżka i południowy kompleks obrębu Piechowice (7813 ha).

Obszar zachodni charakteryzuje się największymi zmianami. Las został wyparty z części grzbietowych, a poza tym można zaobserwować zmiany o względnie równomiernym natężeniu na stokach o różnych ekspozycjach. Zagrożenia wylesieniami stwierdza się już od ok. 600 m n.p.m., a od ok. 750 m n.p.m. wylesienia są masowe. W 1984 r. tereny dotknięte zmianami w szacie leśnej zajmowały ok. 34% powierzchni omawianego obszaru, a na wylesienia przypadło 26%, rozluźnienie zwarcia - 2%, a martwy las - 6%. Obszary martwego lasu znajdowały się w zdecydowanej większości w pasmach Wysoki Grzbiet i Kamienicki Grzbiet.

Obszar południowy odznacza się podobnym natężeniem zmian obejmującym 28% powierzchni leśnej. Wylesienia zajmują 12% powierzchni, martwy las - 3%, a rozluźnione zwarcie - 12%. Zmiany świadczące o degradacji lasu występują na całym obszarze, a ich dolna granica przebiega wzdłuż warstwy 1000 m, chociaż także niżej, lecz w mniejszym natężeniu, występują wylesienia i przerzedzenia drzewostanów.

Obszar centralny porastają lasy o najlepszej kondycji w odniesieniu do omawianych wyżej. Sporadycznie występuje tutaj rozluźnienie zwarcia (1% powierzchni obszaru), a wylesienia zajmujące 10% powierzchni zgrupowane są we wschodniej części analizowanego obszaru.

Analiza kondycji drzewostanów w poszczególnych jednostkach administracji lasów państwowych wykazuje ponadto, że największy udział drzewostanów obumierających ma Karkonoski Park Narodowy (7% powierzchni), natomiast

sporadycznie tylko występują one w obrębie Śnieżka. Drzewostany silnie osłabione występują na stosunkowo dużym obszarze (ok. 35% powierzchni obrębu Szklarska Poręba, 22% powierzchni Karkonoskiego Parku Narodowego i obrębu Świeradów oraz 10-13% obszaru obrębów Piechowice i Śnieżka). Natomiast drzewostany o najlepszej kondycji znajdują się w obrębach Śnieżka i Piechowice (po ok. 60% powierzchni).

Generalnie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wysokości nad poziom morza pogarsza się kondycja lasu, zwiększa się udział drzewostanów zamierających oraz obszarów wylesionych.

Wykorzystując informacje zgromadzone w systemie podjęto także próbę określenia strat masy drzewnej spowodowanych procesami degradacyjnymi na obszarze badań (Ciołkosz i Zawila-Niedźwiecki, 1990). Klasom kondycji drzewostanów świerkowych, wyróżnionym na zdjęciu satelitarnym przypisano określoną doświadczalnie procentową stratę przyrostu drewna (Trampler, 1987).

W celu określenia rocznych strat przyrostu drewna sporządzono zestawienie odpowiednich klas uszkodzeń wydzielonych na zdjęciach satelitarnych, które przedstawiono w tabl. 8.

Z tablicy tej wynika, że roczne straty przyrostu drewna w latach 1984 i 1990, na obszarze blisko 20 000 ha wynosiły odpowiednio 16 400 m³ i 12 800 m³. Zmniejszenie sumarycznej straty przyrostu wynika z ustępowania lasu na badanym obszarze i zwiększania się powierzchni wylesień. Wylesienia zajmowały w 1984 r. - 1635 ha, a w 1990 r. już 3027 ha.

Gdy weźmie się pod uwagę straty spowodowane przedwczesnym wyrębem, dokonywanym wskutek zabiegów ratowniczych w lasach, straty roczne przyrostu masy drzewnej na obszarze ok. 20 000 ha można szacować na 23 000 m³, co daje średnio 1,2 m³/ha/rok, przy średniej krajowej dla drzewostanów pod wpływem oddziaływania emisji SO₂ wynoszącej 0,6 m³/ha/rok. Dane te należy traktować jako orientacyjne, gdyż nie brano tu pod uwagę warunków bytowania poszczególnych drzewostanów, a jedynie średnie dla klas wydzielonych na zdjęciach satelitarnych.

Tablica 8

Straty przyrostu masy drzewnej w Sudetach Zachodnich

Kategoria lasu	Powierzchnia (ha)		Przyrost potencjalny (m ³ /ha)		Wskaźnik straty przyrostu	Całkowita strata (m ³)		
	1984	1990	1984	1990		1984	1990	
Drzewostany osłabione	2883	3136	9500	10300	0,25	2375	2575	
Drzewostany silnie osłabione	4376	4433	14400	14600	0,50	7200	7300	
Drzewostany zamierające	2771	1185	9100	3900	0,75	6825	2925	
	Razem						16400	12800

Podsumowując wyniki analiz przeprowadzonych dzięki systemowi informacji geograficznej Sudetów Zachodnich należy stwierdzić, że o pełnej użyteczności zdjęć satelitarnych może być mowa dopiero wtedy, gdy analizuje się je w powiązaniu z innymi informacjami zgromadzonymi w obiektowych i opisowych bazach danych. SIP umożliwi efektywne wykorzystanie wieloźródłowych informacji, których analiza metodami tradycyjnymi byłaby niezwykle pracochłonna, a niekiedy wręcz niemożliwa.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niniejsza praca ukazuje wartość zdjęć satelitarnych w monitorowaniu lasu oraz ich użyteczność jako źródła informacji odniesionych przestrzennie. Analiza danych satelitarnych pozwoliła opracować i zweryfikować praktycznie metodę monitorowania drzewostanów świerkowych na obszarach, gdzie następują szybkie i rozległe zmiany degradacyjne stanu lasu.

Wyniki interpretacji zdjęć satelitarnych, w połączeniu z danymi inwentaryzacyjnymi (terenowymi i lotniczymi), zgromadzonymi w bazie danych systemu informacji przestrzennej mogą stworzyć nowe jakościowo narzędzie monitorowania lasu na dużych obszarach. Wieloterminowe zdjęcia satelitarne pozwalają na szybkie określenie zmian, jakie zachodzą pomiędzy poszczególnymi zobrazowaniami, a także prognozować zasięg i trendy zmian w stanie lasu na konkretnym obszarze.

Schemat postępowania ze zdjęciami satelitarnymi w celu wydobycia z nich pożądaných informacji przedstawiono w rozdziale 5.1. W przypadku interpretacji treści leśnej najczęściej stosowaną drogą dochodzenia do optymalnej postaci obrazowej powinno być stosowanie następujących operacji:

- Poprawianie obrazu poprzez operacje na histogramach (rozciągnięcie i wyrównanie histogramów).
- Wykonywanie korekcji atmosferycznych w celu usunięcia efektu atmosfery, osłabiającego natężenie promieniowania elektromagnetycznego na drodze Słońce-Ziemia-satelita.
- Wykonywanie korekcji, umożliwiających porównywanie zdjęć wykonanych w różnych porach roku. Takie korekcje radiometryczne usuwają zróżnicowanie poszczególnych zdjęć, spowodowane różną pozycją Słońca w momencie ich rejestracji.
- Geometryzacja zdjęć w stosunku do map lub obrazowych warstw informacyjnych.
- Filtracja wysokich częstotliwości przestrzennych w przypadku zdjęć Landsat i SPOT oraz niskich częstotliwości przestrzennych w przypadku zdjęć ERS-1 i JERS-1.
- Wagowanie kanałów (TM5/4 i TM4/3) w przypadku analiz dotyczących lasów o różnym oświetleniu (stoki nasłonecznione i zacienione).

- Obliczanie składowych głównych w przypadku interpretacji wielokanałowych zdjęć satelitarnych, np. siedmiokanałowych zdjęć TM i konieczności ograniczenia kanałów do zbioru podstawowego.

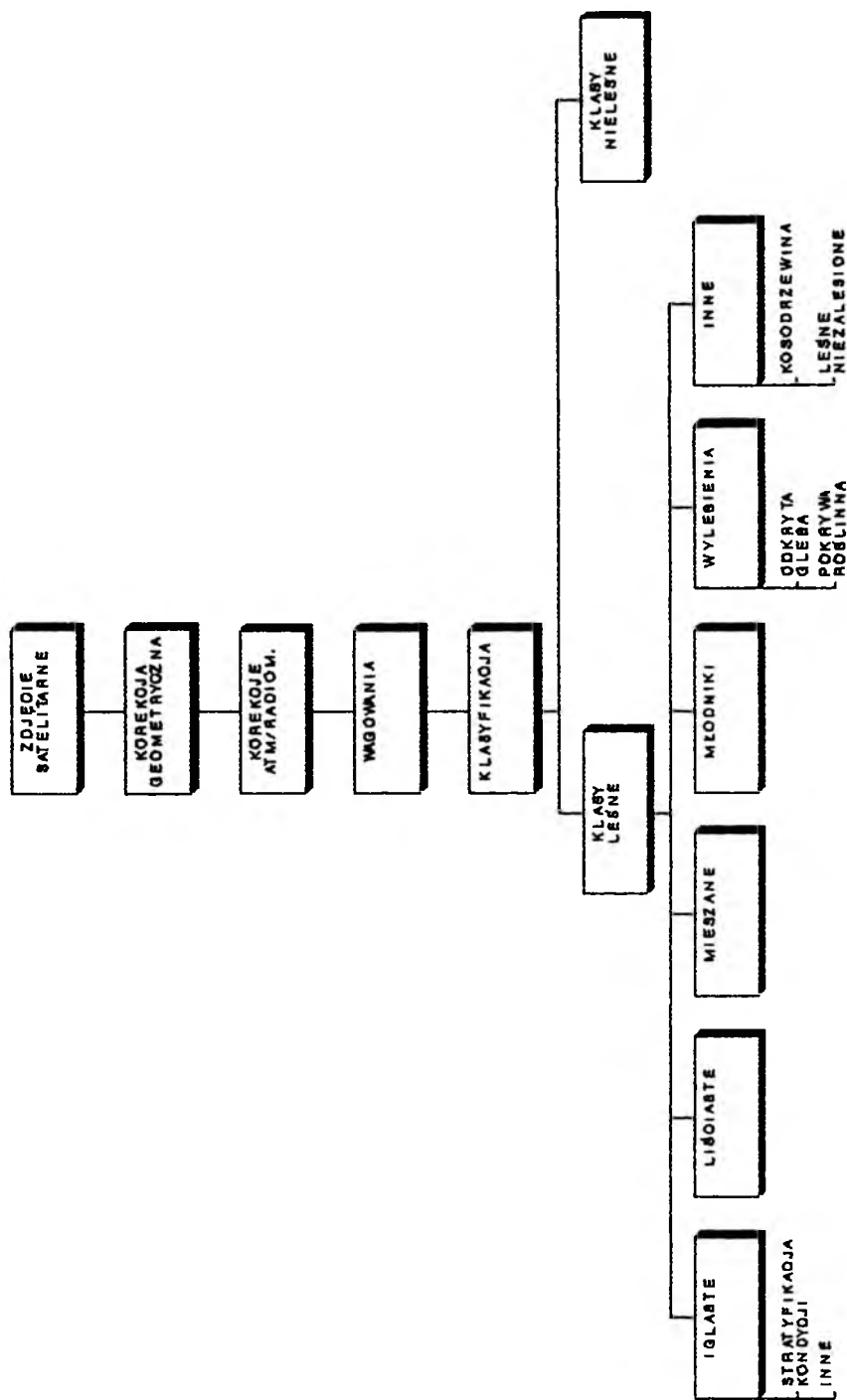
- Klasyfikacja (szczególnie nadzorowana) traktowana jako proces iteracyjny oraz weryfikowanie kolejnych wyników, na podstawie statystyk spektralnych i powierzchniowych wydzielonych klas, zdjęć lotniczych, danych inwentaryzacyjnych i sprawdzeń terenowych. Klasyfikacji powinien podlegać jedynie obszar bezpośredniego zainteresowania interpretatora, a pozostała część zdjęcia powinna być zakryta maskami. Maskami należy także pokryć obszary trudne do jednoznacznego sklasyfikowania, a możliwe do zdefiniowania na podstawie innych materiałów źródłowych.

W celu stratyfikacji kondycji drzewostanów świerkowych na podstawie zdjęć satelitarnych należy, w miarę możliwości, korzystać ze zdjęć wykonanych skanerem Thematic Mapper. Optymalnym terminem pozyskiwania zdjęć do tego celu jest okres pomiędzy 15 czerwca i 15 września. Oczywiście, daty te należy traktować jako terminy orientacyjne, a ostateczny wybór zdjęć należy uzależniać od stanu fenologicznego roślinności oraz bezchmurnej i bezmgielnej pogody. Szczególnie przydatne są zdjęcia wykonane w lipcu, gdy Słońce zajmuje najwyższe położenie nad linią horyzontu, co zapewnia najlepsze oświetlenie powierzchni Ziemi.

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 20, przygotowanie zdjęć satelitarnych do interpretacji treści leśnej powinno obejmować geometryzację zdjęcia oraz korekcje radiometryczne.

Przy wszelkich operacjach na zdjęciach satelitarnych należy stosować takie przetworzenia, które nie zniekształcają faktycznej wartości spektralnej określonych obiektów na powierzchni Ziemi. Dlatego też do korekcji geometrycznych należy raczej stosować metodę najbliższego sąsiedztwa niż transformację sześcienną. Z tych samych powodów niezwykle ostrożnie należy stosować przepróbkowanie (*resampling*).

O pełnej użyteczności zdjęć satelitarnych może być mowa dopiero wtedy, gdy analizuje się je w powiązaniu z innymi informacjami zgromadzonymi w obiektowych i opisowych bazach danych systemu informacji przestrzennej. Podczas badań prowadzonych na terenie Sudetów stwierdzono, że w celu dokonywania wiarygodnych analiz stanu lasu na podstawie zdjęć satelitarnych konieczne jest korzystanie z wielu informacji pochodzących z takich źródeł, jak: mapy topograficzne i tematyczne, numeryczny model terenu, zdjęcia lotnicze, opisy inwentaryzacyjne drzewostanów i dane monitoringowe, jak również wyniki terenowych sprawdzeń klasyfikacji zdjęć satelitarnych. W celu wykorzystania tych dodatkowych źródeł informacji o lesie w procesie interpretacji zdjęć satelitarnych, muszą być one doprowadzone do postaci cyfrowej w wyniku dygitalizacji (ręcznej lub skanowania).



Rys. 20. Schemat interpretacji treści leśnej zdjęć satelitarnych

W przypadku opracowywania treści leśnej zdjęć satelitarnych pożądane jest zdigitalizowanie granicy polno-leśnej oraz linii podziału przestrzennego lasu. Oddzielenie na zdjęciu obszaru leśnego od innych form użytkowania ziemi pozwala na skoncentrowanie się interpretatora tylko na lesie, co umożliwia uniknięcia błędów klasyfikacji, wynikających z podobieństwa spektralnego niektórych obiektów leśnych i rolnych, np. odnowień i zalesień oraz łąk i ozimin. Naniesienie na zdjęcie linii ostępowych, oddziałowych i granic drzewostanów umożliwia natomiast przeprowadzenie analiz przestrzennych w odniesieniu do poszczególnych drzewostanów oraz ich powiązanie z danymi taksacyjnymi, znajdującymi się w bazach danych opisowych.

Innym przykładem obiektu, który powinien być zdigitalizowany z map tematycznych lub wyników interpretacji zdjęć lotniczych, jest kosodrzewina i strefa przejściowa: świerki-kosówka. Charakterystyki spektralne tych obszarów są zbliżone do odpowiedzi spektralnych drzewostanów świerkowych zamierających i martwych i dlatego rozróżnienie tych dwóch klas interpretacyjnych jest stosunkowo trudne. Dygitalizacja zasięgu kosówki umożliwia wymaskowanie tego obszaru podczas klasyfikacji zdjęcia satelitarnego.

Bardzo użytecznymi obiektami terenowymi przy interpretacji zdjęć satelitarnych są także: sieć transportowa, hydrografia oraz inne elementy topograficzne. Umożliwiają one wpasowanie zdjęć w mapę oraz ułatwiają rozpoznawanie poszczególnych obiektów terenowych, odwzorowanych na zdjęciach.

Z zebranych doświadczeń w zakresie interpretacji zdjęć satelitarnych obszaru Sudetów wynika, że numeryczny model terenu jest niezwykle przydatny przy klasyfikowaniu zdjęć obszarów górskich, wykonanych przez satelity Landsat i SPOT. W przypadku interpretacji zdjęć obszarów górskich, wykonanych przez satelity ERS-1 i JERS-1, stosowanie NMT jest wręcz konieczne.

Podczas interpretacji zdjęć satelitarnych wielce przydatne są także opisy taksacyjne urządzania lasu, powiązane z mapami podziału przestrzennego lasu oraz z opisowymi danymi monitoringowymi, dotyczącymi poszczególnych drzewostanów.

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki badań pozwalają sformułować następujące wnioski:

- najbardziej przydatnymi zdjęciami satelitarnymi do monitorowania lasów są zdjęcia wykonywane skanerem Thematic Mapper;
- zdjęcia wykonane przez satelitę SPOT, pomimo wysokiej rozdzielczości terenowej, mogą służyć do oceny stanu lasu jedynie jako źródło danych uzupełniających, a to z powodu braku rejestracji zakresu podczerwieni średniej, w której najlepiej odwzorowują się zmiany kondycji roślin;
- zdjęcia radarowe mogą być wykorzystywane do monitorowania lasów jako dodatkowe źródło informacji; ich głównym atutem jest niezależność od warunków pogodowych pozyskiwanie zobrazowań powierzchni Ziemi, jednakże dystorsja obrazu stanowi duże utrudnienie w analizie zdjęć, szczególnie w przypadku terenów górskich;

- w odniesieniu do cech taksacyjnych drzewostanów, najsilniejsze związki z informacjami pozyskanymi ze zdjęć wykonywanych przez satelitę Landsat TM wykazują wskaźniki kondycji (Df, Dc i Dm);

- wartość sygnału radarowego, rejestrowanego przez SAR satelity ERS-1, jest związana z takimi parametrami drzewostanów, jak: wiek, pierśnica, średnica koron, liczba drzew martwych w drzewostanie głównym oraz kondycja drzew, opisywana wskaźnikiem Dm;

- interpretacja zdjęć radarowych daje najlepsze rezultaty, gdy jest dokonywana na kompozycji barwnej utworzonej ze zdjęć wieloterminowych;

- zarówno wyniki interpretacji wizualnych, jak i klasyfikacji cyfrowych zdjęć satelitarnych, odniesione do danych terenowych i lotniczych, upoważniają do stwierdzenia, że zdjęcia satelitarne, wykonane skanerem Thematic Mapper mogą służyć do kartograficznej prezentacji stanu zdrowotnego drzewostanów świerkowych;

- wieloterminowe zdjęcia satelitarne umożliwiają ocenę zmian stanu lasu w przeciągu analizowanego okresu oraz w pewnym zakresie ocenę prawidłowości gospodarki leśnej na danym obszarze;

- w procesie interpretacji zdjęć satelitarnych konieczne jest sięganie po terenowe i lotnicze dane referencyjne, które umożliwiają dokonywanie wiarygodnych klasyfikacji oraz weryfikację wyników.

Powyższe wnioski upoważniają do stwierdzenia, że odpowiednio dobrane i przetworzone zdjęcia satelitarne, powiązane z bazami danych systemu informacji przestrzennej, umożliwiają ocenę lasów świerkowych i pozwalają na przestrzenne zlokalizowanie różnych elementów opisujących stan lasu.

LITERATURA

BARSZCZEWSKI W., 1991: *Próba oceny zdrowotnego stanu drzewostanów dębowych w Nadleśnictwie Krotoszyn w oparciu o spektrostrefowe zdjęcia lotnicze*. Materiały z sympozjum naukowego w 60-lecie Polskiego Tow. Fotogrametrycznego, Warszawa, Tom III: 7-12.

BEAUBIEN J., 1979: *Forest Type Mapping from Landsat Digital Data*. *Photogram. Eng. Rem. Sens.*, Vol.45, No 8.

BYCHAWSKI W., IRACKA M., ZAWILA-NIEDŹWIECKI T., 1984: *Metoda określania zdrowotnego i sanitarnego stanu lasu na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych*. Opis technologiczny. IGIK-OPOLIS, Warszawa.

BYCHAWSKI W., LINSENBARTH A., MIZERSKI W., 1980: *Charakterystyka zdjęć satelitarnych wykonanych ze stacji orbitalnej Salut-6 w czasie radziecko-polskiego lotu kosmicznego*; w: *Zastosowanie teledetekcji w badaniach środowiska geograficznego*. PWN, Warszawa-Łódź.

BYCHAWSKI W., ZAWILA-NIEDŹWIECKI T., 1990: *Zdjęcia satelitarne w badaniu stanu lasu*; w: *Ocena zasobów leśnych w ekosystemach zagrożonych*. Wyd. SGGW, Warszawa: 45-50.

- BYCHAWSKI W., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., IRACKA M., GLASENAPP E., 1990: *Wielkoobszarowa ocena stanu lasów na podstawie wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych*; w: Określanie zmian zasobów leśnych i ich wartości zachodzących pod wpływem antropopresji. Synteza Nr IV CPBP 04.10.07. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 47-56.
- CHUVIECO E., 1989: *Multitemporal Analysis of TM Images: Application to Forest Fire Mapping and Inventory in a Mediterranean Environment*; in: *Monitoring the Earth Environment*. European Space Agency, ESA SP-1102: 279-285.
- CHUVIECO E., CONGALTON R.G., 1989: *Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping*. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 29, No 2: 147-159.
- CIBULA W.G., 1985: *An analysis of TMS Data on Plant Communities with an Emphasis on the Detection of Stress*. NASA/ERL Report, Earth Resources Laboratory.
- CIOŁKOSZ A., IRACKA M., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1987: *Monitoring of forest decline in Poland by remote sensing*. Proceedings: Seminar on Remote Sensing and Forest Decline Attributed to Air Pollutants, held in Laxenburg, Austria, 11-12 March. IIASA (Laxenburg, Austria)-EPRI (Palo Alto, Ca, USA), EA-5715, Chptr. 7.
- CIOŁKOSZ A., KĘSIK A., 1989: *Teledetekcja satelitarna*, PWN, Warszawa, 294 s.
- CIOŁKOSZ A., MISZALSKI J., OŁĘDZKI J., 1986: *Interpretacja zdjęć lotniczych*, PWN, Warszawa, 410 s.
- CIOŁKOSZ A., POŁAWSKI Z., 1980: *Mapa użytkowania ziemi w skali 1:250000 sporządzona za pomocą wizualnej klasyfikacji treści obrazów satelitarnych*; w: *Zastosowanie teledetekcji w badaniach środowiska geograficznego*. PWN, Warszawa-Łódź.
- CIOŁKOSZ A., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1990: *Remotely sensed data and limitation of forest productivity in Poland*. *Nature & Resources*, Vol. 26, No. 1: 41-44.
- DMYTERKO E., GRZYB M., 1990: *Projekt instrukcji wyznaczania stref szkód ekologicznych w środowisku leśnym na podstawie oceny uszkodzenia drzewostanów świerkowych*. Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa.
- EKSTRAND S., 1993: *Assessment of forest damage using Landsat TM, elevation models and digital forest maps*. Dissertation. Royal Inst. of Technology, Stockholm, Sweden, 110 pp.
- ESTELL W.E., 1980: *NOAA Weather Radio - A New Service Opportunity for Forestry Officials*. *Fire Management Notes*, Vol. 41, No 4.
- EZKOV V.V., METALNIKOV A.P., ISAJEV A.S., SUCHICH V.I., KUNDRIAVCEV W.S., SZCZETINSKIJ E.A., 1986: *Effektivnost' ispol'zowanija kosmiceskoj informacii v lesnom chozajstwie*. *Issled.Zem.Kosm.* Nr 3.
- FRĄCZEK W., OLENDEREK H., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1992: *Systemy informacji przestrzennej*. *Las Polski* Nr 7: 7-9 oraz *Las Polski* Nr 8: 6-7.
- GAŹDZICKI J., 1990: *Systemy informacji przestrzennej*. PPWK, Warszawa-Wrocław, 183 s.

- GRZYB M., DMYTERKO E., 1991: *Instrukcja zbierania informacji z powierzchni testowych do realizacji tematu badawczego "Ocena stanu lasu w ekosystemach zagrożonych z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych"*. Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa.
- HORLER D.N.H., AHERN F.J., 1986: *Forestry information Content of Thematic Mapper data*. *Jnt. J. Remote Sensing*, vol. 7, No 3.
- HORLER D.N.H., DOCKRAY D.E.J., BARNINGER A.R., 1983: *Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content*. *Advances in Space Research*, v.3: 273-277.
- HUSSON A., 1984: *Exemples d'utilisation de la teledetection en France: cartographie des feux de foret*. *Geometre*, No 3.
- IIASA, 1987: *Proceedings of the seminar on remote sensing and forest decline attributed to air pollutants*, held in International Institute for Applied Systems Analysis - Laxenburg, 11-12 March. Edited by EPRI, Palo Alto, California.
- IIASA-IUFRO, 1987: *Forest Decline and Reproduction: Regional and Global Consequences*. Proceedings of a workshop held in Krakow, 23-27 March.
- ITTEN K.I., MEYER P., LEU R., SANDMEIER S.T., BITTER P., SEIDEL K., 1992: *Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of Alpine regions*. University of Zurich-Irchel, Remote Sensing Series, Vol. 18, 48pp.
- KADRO A., 1988: *Use of Landsat-TM data for forest damage inventory*. ESA Publishing.
- KARLIKOWSKI T., ZAWILA-NIEDŹWIECKI T., 1993: *Remote sensing and GIS in fire management of Polish forests*. Proceedings of the ESA-EARSeL Workshop on "Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management", held in Thessaloniki, 4-6 November 1993.
- LILLESAND T.M., KIEFER R.W., 1987: *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- LILLESAND T.M., HOPKINS P.F., BUCHHEIM M.P., MACLEAN A.L., 1986: *The potential impact of Thematic Mapper, Spot and microprocessor technology on forest type mapping under take status conditions*. Environmental Remote Sensing Center, University of Wisconsin, Madison.
- LOPEZ GARCIA M.J., CASELLES V., 1991: *Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data*. *Geocarto Int.* 6: 31-37.
- MONTEITH J.R.L., 1977: *Fizyka środowiska biologicznego*. PWN, Warszawa.
- MOSS D.M., ROCK B.N., 1991: *Analysis of red edge spectral characteristics and total chlorophyll values for red spruce (Picea rubens) branch segments from Mt. Moosilauke, NH, USA*. Proceedings IGARSS' 91, held in Helsinki, Finland on June 3-6, 1991.
- NILSSON S., DUINKER P.(ed), 1987: *Remote Sensing of Forest Decline Attributed to Air Pollution*. IIASA (Laxenburg, Austria)-EPRI (Palo Alto, Ca, USA), EA-5715.
- OLENDEREK H., KORPETTA D., 1992: *Systemy informacji przestrzennej w leśnictwie polski - stan i perspektywy rozwoju*. Materiały II konferencji naukowo-technicznej "Systemy Informacji Przestrzennej", Warszawa.

- OLENDEREK H., KORPETTA D., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1993: *Koncepcja systemu informacji przestrzennej dla parku narodowego na przykładzie Pienińskiego Parku Narodowego*. Ekspertyza dla MOSZNiL. Fundacja "Terra Sana", Warszawa, 60 s.
- PAIVINEN R., LUND H.G., POSO S., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., (ed.), 1993: *IUFRO International Guidelines for Forest Monitoring*. IUFRO Subject Group S4.02-05, 34 pp.
- POŁAWSKI Z., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1987: *Teledetekcja w ocenie stanu środowiska leśnego Sudetów Zachodnich*. Sylwan, Nr 5: 49-60.
- RICHARDS J.A., 1993: *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. 2nd ed., 340 pp.
- ROCK B.N., GRECZYŃSKI J., MOSS D.M., ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1992: *Spectral characterisation of forest decline damage in branch segments of Norway spruce (Picea Abies) in the Sudety Mountains of Poland*. Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Meeting held in Washington, DC, August 2-5, 1992: 271-280.
- ROCK B.N., HOSHIZAKI T., MILLER J.R., 1988: *Comparison of in situ and airborne spectral measurements of blue shift associated with forest decline symptoms in Vermont (USA) and Baden-Wurtemberg (FRG)*. Remote Sens. Envir., No 24: 109-127.
- ROCK B.N., VOGELMANN J.E., WILLIAMS D.L., VOGELMANN A.F., HOSHIZAKI T., 1986: *Remote detection of forest damage*. Bioscience, v. 36: 439-445.
- ROSENGREN M., EKSTRAND S., 1987: *A method aiming at monitoring of large area forest decline using satellite imagery*. Swedish Space Corporation.
- SPANNER M.A., PIERCE L.L., PETERSON D.L., RUNNING S.W., 1990: *Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index*. Inst. J. Remote sensing vol. 11., No. 1: 95-111.
- SUCHICH V.I., 1986: *Ispol'zowanie kosmiceskoj informacii v lesnom chozjajstwie*. Geod. i Kartogr., Nr 4, Moskwa.
- SZUJECKI A., 1988: *Przeobrażenia środowiska leśnego w Polsce na przestrzeni dziejów*. Problemy, Nr 10.
- TRAMPLER T., 1987: *Straty w gospodarstwie leśnym na skutek szkodliwego oddziaływania różnych czynników*; w: Narodowy Program Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej do 2010 roku. Problem 5 - Ochrona Przyrody, Część III, Tom I: 69-72.
- TREVETT J.W., 1986: *Imaging Radar for Resources Surveys*. Chapman and Hall, London-New York, 313 pp.
- WASTENSON L., ALM G., KLEMAN J., WASTENSON B., 1987: *Swedish experiences of forest damage inventory by remote sensing*. Remote Sensing Laboratory, Department of Physical Geography, University of Stockholm.
- WELLES JON M., 1990: *Some indirect methods of estimating canopy structure*. Remote Sensing Reviews.

WILLIAMS D.L., NELSON R.F., 1986: *Use of Remotely Sensed Data for Assessing Forest Stand Conditions in the Eastern United States*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-24, No 1.

WILSON R., SPANN M., 1988: *Image Segmentation and Uncertainty*. Research Studies Press Ltd. Letchworth, Hertfordshire, England, 130 pp.

ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1990a: *Wybrane zagadnienia wykorzystania zdjęć wykonanych przez satelity Landsat TM i SPOT w badaniu lasu*. Prace IGiK, Tom XXXVII, zeszyt 1-2 (84-85): 63-73.

ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1990b: *Zespół ekspertów EKG/FAO ds satelitarnej detekcji uszkodzeń lasu*. Biul. Inf. BOINTE IGiK, T. XXXV, Nr 1: 6-7.

ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., 1993: *Use of satellite data and GIS technology for forest damage monitoring*. Final report of the CEC-JRC Project No 2484. Laboratory of Remote Sensing and Forest Management, University of Gent, Belgium, 40 pp.

ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., BOCHENEK Z., STRZELECKI P., 1994: *Wykorzystanie zdjęć satelitarnych ERS-1 w inwentaryzacji szkód leśnych*. Prace IGiK, Tom XLI, zeszyt 89: 81-96.

ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., GRUSZCZYŃSKA M., STRZELECKI P., 1993: *Wskaźnik LAI w teledetekcyjnej ocenie kondycji lasu*. Sylwan Nr 6: 55-60.

ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI T., MIERZWIŃSKI G., STRZELECKI P., 1992: *Wykorzystanie zintegrowanych danych terenowych i teledetekcyjnych w monitorowaniu lasu; w: Metody oceny stanu lasu - stan aktualny i kierunki ich doskonalenia*. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa-Seria B, Nr 18: 79-88.

Recenzował: prof. dr hab. Andrzej Ciołkosz

Przyjęto do opublikowania w czerwcu 1994 r.

Tomasz Zawila-Niedźwiecki

EVALUATION OF FOREST STATE IN THREATENED ECOSYSTEMS
WITH THE USE OF SATELLITE IMAGES AND GIS

S u m m a r y

The article presents results of the research works conducted at the Remote Sensing and Spatial Information Centre - OPOLiS of the Institute of Geodesy and Cartography in 1990 - 94, within European LAROE project (Large Area Operational Experiment for Forest Damage Monitoring in Europe Using Satellite Remote Sensing), carried out under auspices of the FAO - European Forestry Commission and coordinated by UNEP - GRID Geneva.

The main aim of LAROE experiment is to prepare and test a method, which would integrate remotely sensed data with information on forest damage, collected through conventional examinations. Thus it was decided to map present range and degree of forest damage, to characterize quantitatively areal changes and degree of damage of stands during last twenty years, as well as to prepare and test the method, which uses remote sensing for forest monitoring and for forest state assessment.

Sudetic spruce stands located at Izerskie Mountains, Karkonosze, Sowie Mountains and Stołowe Mountains are the object of studies in the presented work.

Series of satellite images, acquired by Landsat MSS and TM, SPOT, Kosmos and ERS-1, were collected for the study area, starting from 1982. Areas characterized by various stands and different forest damage, chosen on the basis of satellite images, were next photographed on aerial colour-infrared Kodak Aerochrome 2443 film. Archival aerial photographs, taken on Russian SN-10 film, were also used.

As reference data results of forest-management inventory, as well as results of inventory of forest quality conducted especially for LAROE project, were utilized. Simultaneously, supplementary spectral measurements were done on the selected test sites; spectral reflectance in visible and near-infrared bands was determined for needles gathered from trees variously affected by pollution, hence characterized by different chlorophyll and water content. These parameters change, depending on degree of damage of trees.

Large amount of data was collected in the course of studying forest state in the Sudety Mountains. Therefore forest spatial information system, created at IGiK-OPOLiS, based on INTERGRAPH software and hardware, was used for analysis of these data.

All acquired descriptive information was stored at relational databases, while spatial information at object-oriented databases; they formed together geographic information system. It enabled to conduct numerous spatial analyses, among others analyses of relations between spectral characteristics of stands and their ground parameters. These analyses were done for the whole dataset, as well as for particular slopes characterized by different aspects. Division into aspects is important, due to differences in illumination of particular slopes. Satellite images are usually recorded at morning hours, characterized by quite low sun elevation angle, which results in shadowing some aspects in mountainous regions.

The presented work demonstrates usefulness of satellite images as a source of information referred spatially. Analysis of satellite data allowed to prepare and verify practically method of monitoring spruce stands for the areas, where rapid and extensive degradation changes of forest state occur.

Results of interpretation of satellite images combined with inventory data (ground and aerial), stored at GIS database can create new tool for large-area forest monitoring. Multitemporal satellite images allow for rapid assessment of changes occurring between particular dates; they enable to predict range and trends of changes in forest state within particular area.

In case of interpretation of forests the most often used method of obtaining optimum image should be based on the following operations:

- image enhancement through histogram operations (contrast stretching, histogram equalization)
- atmospheric correction in order to remove atmospheric effects, which modify intensity of electromagnetic spectrum, coming from Sun through Earth's surface to satellite

- corrections enabling comparison of multitemporal images. These radiometric corrections remove variability due to differences in Sun position during data collection
- image-to-map and image-to-image rectification
- high-pass filtering for Landsat and SPOT images and low-pass filtering for ERS-1 and JERS-1 images
- band ratioing (TM5/4, TM4/3) in case of analyses concerning variously illuminated forests (sun-exposed and shaded slopes)
- principal component transformation, in case of interpretation of multiband satellite images, e.g. 7-band TM images, which should be reduced in number of channels to basic set of data
- classification (especially supervised), treated as iterative process and verification of the succeeding results on the basis of spectral and areal statistics of distinguished classes, as well as considering aerial photographs, inventory and ground-truth data.

Classification should be done only for the area of interest, while rest of image should be masked. Masks should be also used for areas, which can be hardly classified, while they can be delineated with the use of the other source materials

We can tell, that satellite images can be fully useful only, if they are analysed in conjunction with information stored at object-oriented and descriptive databases of the spatial information system. It was found in the course of studies conducted at the Sudety Mountains, that in order to make reliable analyses of the state of forest on the basis of satellite data, it is necessary to utilize a lot of information, derived from many sources: topographic and thematic maps, digital terrain model (DTM), aerial photographs, inventory descriptions of stands and monitoring data, as well as results of ground checking of satellite classifications. In order to use efficiently these supplementary information sources at the process of interpretation of satellite images, they should be in digital form.

The experience gained during interpretation of satellite images for the Sudety Mountains revealed, that digital terrain model (DTM) is very useful for classifying images of mountainous areas, collected by Landsat and SPOT satellites. In case of analysing ERS-1/JERS-1 satellite images use of DTM is indispensable.

Results of studies presented in this work permit to draw the following conclusions:

- Landsat Thematic Mapper images are the most useful satellite data for forest monitoring
- SPOT images, despite their high resolution, can serve only as a source of additional information for forest state evaluation, due to lack of middle-infrared band, which is the best for detecting changes in vegetation conditions
- radar images can be used for forest monitoring as an auxiliary source of information: weather-independent acquisition is the main virtue of these data, however image distortion causes great difficulties, particularly in analysing mountainous regions
- as far as taxation features are concerned, the strongest relations exist between quality indices and information derived from Landsat TM data
- values of radar response, recorded by ERS-1 SAR sensor, are related to the following stand parameters: age, breast diameter, crown diameter, number of dead trees at the main stand and vigour of trees
- interpretation of radar images gives the best results, while it is done on multitemporal colour composites
- results of visual interpretation, as well as results of digital classifications of satellite data, related to ground information and to aerial photographs, permit to draw conclusion, that Landsat TM satellite images are useful for cartographic presentation of health state of spruce stands

- multitemporal satellite images allow to assess changes in forest state within the studies period and to evaluate partly correctness of forest management at the examined area
- it is necessary to use ground and aerial data at the process of interpretation of satellite images; they enable to perform reliable classifications and to verify results.

The above mentioned conclusions give a basis for stating, that properly selected and processed satellite images, related to GIS databases, enable evaluation of spruce stands and allow for locating spatially various elements describing state of forest.

Translation: Zbigniew Bochenek

Томаш Завила-Недзвецки

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСА В ОПАСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ И СИСТЕМ ГЕОИНФОРМАЦИИ

Резюме

Настоящая работа представляет результаты исследований, проводимых в Центре дистанционного зондирования и геоинформации - OPOLIS - Института геодезии и картографии в 1990 - 1994 годах в рамках европейского проекта LAROE (Large Area Operational Experiment for Forest Damage Monitoring in Europe Using Satellite Remote Sensing), выполняемого под покровительством Европейской лесной комиссии ФАО и координированного ЮНЕП - Женева.

Главной целью эксперимента LAROE является разработка и тестирование метода, который бы интегрировал данные, собранные с помощью дистанционного зондирования с информацией о повреждении лесов, полученными в ходе традиционных исследований. В предпосылках к эксперименту решено было картографировать актуальный объём и степень повреждения лесов, дать количественную характеристику поверхностных изменений и степени повреждения древостоев в период последнего двадцатилетия, а также разработать и протестировать метод, использующий дистанционное зондирование для мониторинга и оценки состояния лесов.

Объектом исследований, представленных в этой работе, являются Судетские еловые древостои в цепях Изерских гор, Карконош, Сових гор и Столовых гор.

Для территории исследований были собраны серии снимков, выполненных спутниками Landsat MSS, Landsat TM, SPOT, Космос и ERS - 1, начиная с 1982 года. Выбранные на спутниковых снимках территории с дифференцированным древостоем и степенью повреждения были сфотографированы на спектрзональной плёнке Kodak Aerochrome 2443. Были использованы также архивные аэроснимки с 1984 г., выполненные на русской плёнке СН - 10.

В качестве рекомендованных данных были использованы результаты инвентаризации лесоустройства, как и результаты инвентаризации состояния леса, проведённые специально для целей проекта LAROE. Одновременно на избранных тестовых участках были проведены дополнительные спектральные измерения отражения электромагнитного излучения (в видимом и инфракрасном

диапазоне спектра) через хвою, собранную с деревьев в разной степени подверженных действию загрязнения, а тем самым с дифференцированным содержанием хлорофилла и воды. Ибо эти параметры изменяются в зависимости от степени повреждения растительности.

Во время исследований состояния леса в Судетах было собрано огромное количество данных. Поэтому для их анализа была использована лесная система геоинформации, которая была разработана в ИГиК - ОПОЛиС на основе оборудования и программного обеспечения INTERGRAF.

Все полученные во время исследований информации в виде описания были собраны в базах реляционных данных, а пространственные информации в базах объектных данных, которые создали систему географической информации. Это дало возможность проведения ряда пространственных анализов, а, между прочим, анализов связи между спектральными характеристиками древостоев и их полевыми параметрами, которые были проведены по отношению ко всей базе данных, так и с учётом отдельных экспозиций. Деление на экспозиции имеет значение ввиду разниц в освещении отдельных склонов. Спутниковая съёмка производится чаще всего в раннее время, когда солнце относительно низко и когда в горах некоторые экспозиции находятся в тени.

Настоящая работа указывает на полезность спутниковых снимков в качестве источника информации отнесённых к пространству. Анализ спутниковых данных дал возможность разработать и практически проверить метод мониторинга еловых древостоев на территориях, где происходят быстрые и обширные деградационные изменения в состоянии леса.

Результаты интерпретации спутниковых снимков в сочетании с инвентаризационными данными (полевыми и самолетными), собранными в базе данных системы географической информации, могут создать качественно новое орудие мониторинга леса на больших пространствах. Многократные спутниковые снимки разрешают быстро определить изменения, какие происходят между отдельными изображениями, а также прогнозировать объём и тенденции изменений в состоянии леса на конкретной территории.

В случае интерпретации лесного содержания наиболее распространённым путём для получения оптимального вида изображения должно быть применение следующих операций:

- Исправление изображения путём операций на гистограммах (растяжка и уравнивание гистограмм).
- Проведение атмосферной коррекции с целью устранения эффекта атмосферы, ослабляющего напряжение электромагнитного излучения на пути Солнце-Земля-спутник.
- Проведение коррекции, дающей возможность сравнения снимков, выполненных в разное время года. Такие радиометрические коррекции устраняют дифференциацию отдельных снимков, вызванную разной позицией Солнца в момент их регистрации.
- Геометризация снимков относительно карт или изобразительных информационных слоёв.
- Фильтрация высоких пространственных частот в случае снимков Landsat и SPOT, а также низких пространственных частот в случае снимков ERS - 1 и JERS - 1.

- Деление каналов (TM5/4 и TM4/3) в случае анализов лесов с разным освещением (освещённые и затемнённые склоны).

- Вычисление главных составляющих в случае интерпретации многоканальных спутниковых снимков, например, семиканальных снимков TM и необходимости ограничения каналов до основного множества.

- Классификация (особенно "с учителем") рассматриваемая как итерационный процесс, а также проверка очередных результатов на основе спектральных статистик и выделенных поверхностных классов, аэроснимков, инвентаризационных данных и полевых проверок. Классификации должна подвергаться единственно территория, представляющая непосредственный интерес для интерпретатора, а остальная часть снимка должна быть закрыта масками. Масками следует также закрыть территории трудные для однозначной классификации, которые можно определить лишь на основе других исходных материалов.

О полной полезности спутниковых снимков может быть речь только тогда, когда они анализируются вместе с другими собранными информацией в объектных и описательных базах данных геоинформационной системы. Во время исследований, проводимых на территории Судетов, установлено, что для проведения достоверных анализов состояния леса на основе спутниковых снимков, необходимо пользоваться многими информацией, происходящими из таких источников, как: топографические и тематические карты, цифровая модель местности, аэроснимки, инвентаризационное описание древостоев и данные мониторинга, а также результаты полевых проверок классификации спутниковых снимков. С целью использования этих дополнительных источников о лесах в процессе инвентаризации спутниковых снимков, следует их привести в цифровой вид.

Из собранного опыта относительно интерпретации спутниковых снимков территории Судетов вытекает, что цифровая модель местности исключительно пригодна при классификации снимков горных территорий, выполненных спутниками Landsat и SPOT. В случае интерпретации снимков горных территорий, выполненных спутниками ERS - 1 и JERS - 1, применение цифровой модели местности является просто необходимым.

Представленные в настоящей работе результаты исследований дают возможность сформулировать следующие выводы:

- наиболее пригодными спутниковыми снимками для мониторинга лесов являются снимки, выполненные сканером Thematic Mapper,

- снимки, выполненные спутником SPOT, несмотря на высокую полевую разрешительную способность, могут служить для оценки состояния леса единственно в качестве источника дополнительных данных ввиду отсутствия регистрации диапазона среднего инфракрасного излучения, в котором лучше всего отображаются изменения в состоянии растительности,

- радиолокационные (радарные) снимки могут быть использованы для мониторинга лесов в качестве дополнительного источника информации; их главным достоинством является получение изображения поверхности Земли независимо от атмосферных условий, однако дисторсия изображения доставляет большие затруднения при анализе снимка, особенно в случае горных территорий,

- относительно таксационных характеристик древостоев самые тесные связи с информацией, полученными со снимков, выполненных спутником Landsat TM, проявляют показатели состояния древостоев,

- величина радиолокационного сигнала, зарегистрированного через SAR спутника ERS - 1, связана с такими параметрами древостоев, как: возраст, диаметр ствола на высоте груди, диаметр крон, количество мёртвых деревьев в основном древостое, а также состояние деревьев,

- интерпретация радиолокационных снимков даёт самые лучшие результаты тогда, когда она производится на синтезированных снимках, созданных на основе многократных съёмки,

- как результаты визуальной интерпретации, так и классификации цифровых космических снимков, отнесённые к полевым и самолётным данным, дают возможность констатировать, что спутниковые снимки, выполненные сканером Thematic Mapper могут служить для картографического представления состояния здоровья еловых древостоев,

- многократные космические снимки дают возможность оценить изменения в состоянии леса в течение анализируемого периода, а также оценить в некотором объёме правильность лесоустройства на данной территории,

- в процессе интерпретации спутниковых снимков необходимо прибегать к полевым и самолётным рекомендательным данным, которые дают возможность проведения достоверной классификации и проверки результатов.

Вышеуказанные выводы уполномачивают констатировать, что соответствующим образом подобранные и преобразованные спутниковые снимки, связанные с базами данных системы геоинформации, разрешают произвести оценку еловых лесов и пространственную локализацию различных элементов, описывающих состояние леса.

Перевод: Róża Tołstikowa