

Metody badania struktury lasów okolic Warszawy na podstawie obrazów satelitarnych Landsat ETM+

*Methods of Research of Warsaw Vicinity Forests Structure
on the Basis of Landsat Satellite Images*

Magdalena WRZESIEŃ

As early as in the 19th century, with the taking of the first photographs of forests from the air and from an opposite slope position, possibilities of using remote sensing and photogrammetry in forestry were perceived. This was the beginning of research with the use of these two methods in forest taxation. Analysing forest structure basing on satellite data was started following the launch of the first LANDSAT satellite in 1972. Spatial (80 m) and spectral (four channels) resolutions of the first sensors enabled to distinguish deciduous, coniferous and mixed forest stands. Launching more technologically advanced satellites with better and better parameters (Landsat Thematic Mapper and Enhanced Thematic Mapper, SPOT, IKONOS) enabled raising the level of detail and extending the scope of elements subject to research. This data was mainly used in studies of large areas and allowed to distinguish single-species forest stands with the division into age classes, different degrees of species mixture, their density and habitats. In addition to that, the condition of trees was analysed, and inventories were taken of fires and fire sites.

In the submitted work used were fragments of a satellite image obtained by the Landsat ETM+ satellite with a spatial distribution of 30 m and a spectral distribution of seven channels. Topographic maps in the "1942" coordinate system were also used to enable preliminary processing of the remote sensing data, in addition to the forest stand maps used to identify the classes and ultimately to determine the accuracy of the classification.

The aim of the project was to verify the supervised classification as a research method for studying the age and structure of species of the forest stands in the Sieraków Reserve, the Chojnów Range and the Kabaty Forest, and to offer the evaluation of the used materials. Another objective of the study was to examine the structure of the analysed forest complexes using indicators from landscape ecology.

Three forest complexes situated in the vicinity of Warsaw were selected for the analysis: the Sieraków reserve being a part of the Kampinos National Park, the Chojnów Range in the Chojnów Landscape Park and the Kabaty Forest. The selected areas differ in size, level of protection and accessibility to man.

In the classification process, four channels were taken under consideration (TM2, TM3, TM4, TM5). On their basis, two three-channel

bands were created (TM2, TM3, TM4 and TM3, TM4, TM5), in addition to a single TM4 channel. During the analysis of forest stand maps, colour compositions, results of unsupervised classification and spectral curves, identified were classes that can be distinguished in satellite images. Subsequently, training fields were selected and spectral signatures of individual species and their age ranges were determined. As a next step, a supervised classification was performed using the maximum likelihood classifier. As a result of this exercise, maps showing the species and age structure in the analysed forest complexes were produced; their accuracy was determined using the error matrix and the kappa coefficient of agreement. Finally, maps classified with the highest accuracy were selected and analysed with the use of indicators from landscape ecology. The quantitative profile was obtained on the basis of measures describing the surface, shape, neighbourhood, diversity, density and entropy at the level of classes and of the entire forest landscape.

Basing on the analysis of the findings, the following conclusions were formulated:

- A supervised classification of Landsat satellite images allows to identify, in a general way, the composition of species and age class intervals for heterogeneous forest complexes;
- With a higher degree of accuracy it is possible to identify a composition of species than age class intervals;
- Despite the location in the same biogeographic region, it is not possible to determine uniform spectral signatures for the analysed areas;
- Errors are due to the averaged information obtained by the Landsat satellite, to the generalised data recorded in the forest stand maps and in the taxation descriptions, and also to the divergence of the dates of taking images and producing maps;
- Indicators describing the forest stand structure in quantitative terms supplement the qualitative information contained in the post-classification maps;
- The description developed on the basis of the indicators reflects the data provided in the taxation descriptions and on the forest maps;
- Results of the qualitative analysis depend on the type of remote sensing data and in particular on their spatial resolution.

Wstęp

Las jest złożonym systemem przyrodniczym, który pełni szereg funkcji zarówno społecznych, jak i przyrodniczych jako jeden ekosystem, ale w szerszym ujęciu las jest składową większej całości – elementem środowiska przyrodniczego, oddziałującym z pozostałymi jego częściami.

Teledetekcja jest jednym z narzędzi, które mogą się w znacznym stopniu przyczynić do poszerzenia wiadomości na temat lasów i uzupełnić już istniejące metody badawcze, jak również wspomóc działania w procesach decyzyjnych na różnych szczeblach administracji. Teledetekcja ma znaczenie jako źródło pozyskiwania i przetwarzania danych.

W latach 70. wraz z wprowadzeniem na orbitę satelitów środowiskowych rozpoczęto prace nad zastosowaniem obrazów satelitarnych w badaniach przyrodniczych. Jednym z kierunków badań było sprawdzanie możliwości klasyfikowania obrazów satelitarnych w celu pozyskiwania danych na temat lasów. Niska rozdzielczość przestrzenna (80 m) i spektralna (4 kanały) obrazów wykonanych skanerem MSS (Multispectral Scanner System) zainstalowanym na pierwszym z serii satelitów Landsat, umożliwiała wydzielenie jedynie drzewostanów iglastych, liściastych i mieszanych (Ciołkosz, Poławski, 1980). Dane ze skanera MSS były także przydatne do badania rozkładu przestrzennego zniszczeń lasów na obszarach przemysłowych (Bychawski, i in., 1980). Pierwsze analizy zobrażeń satelitarnych polegały przede wszystkim na wizualnej ocenie i późniejszej weryfikacji wyników w terenie.

Dzięki wprowadzeniu na orbitę satelitów rejestrujących powierzchnię Ziemi z większą dokładnością, uzyskaną poprzez zwiększenie rozdzielczości spektralnej – Landsat TM (Thematic Mapper) obrazuje Ziemię w 7 kanałach spektralnych; poprawę rozdzielczości terenowej – Landsat TM wielospektralny – 30 m, SPOT wielospektralny – 20 m i panchromatyczny – 10 m, wzrosła ilość informacji możliwych do pozyskania. Analizy zdalnie pozyskiwanych danych pozwoliły na wyodrębnienie drzewostanów jednogatunkowych z podziałem na klasy wieku oraz wydzielenie różnych stopni zmieszania gatunkowego (Beaubien, 1979). Prowadzono badania dotyczące wykorzystania zobrażeń satelitarnych do określania stanu lasu (Bychawski i in., 1980), monitorowania i inwentaryzacji lasów zdegradowanych (Zawiła-Niedźwiecki, 1990; Bochenek i in., 1997) oraz w ochronie przeciwpożarowej lasów poprzez inwentaryzowanie pożarów i pożarzystk oraz szacowanie zagrażenia pożarowego (Chuvieco, Congalton, 1989). Na podstawie danych satelitarnych szacowano także zapas drewna i straty przyrostu (Zawiła-Niedźwiecki, 1990).

Jakość dostępnych danych i narzędzi do ich przetwarzania pozwalała przede wszystkim na badania obejmujące obszary o znacznej powierzchni (Bochenek i in., 1997) i identyfikację typów lasu, siedliska, zwarcia oraz analizy stanu zdrowotnego.

Struktura drzewostanów jest elementem uwzględnianym w opisie taksacyjnym, który stanowi charakterystykę drzewostanu pod względem siedliskowych warunków wzrostu i wskazówek gospodarczych. Opis taksacyjny jest sporządzany w ramach planu urządzania lasu. Struktura lasu wynika z warunków siedliskowych, zależy od gatunku panującego i jego wieku oraz jest konsekwencją wszystkich zabiegów gospodarczych oraz zdarzeń losowych (np. pożary i wiatrolomy) zaistniałych na danym obszarze. Pełny wykaz parametrów, które powinny być opisane podczas prac urzędzeniowych jest zawarty wraz z zalecanymi metodami ich pomiaru w instrukcjach urządzania lasu (*Instrukcja urządzania...*, 2003).

Parametry opisujące strukturę drzewostanów są określane w większości wizualnie. Zebrane dane są przedstawiane w postaci tabel i map, które odnoszą się do jednej daty (plany urządzania lasu są wykonywane co 10 lat). Ich uzupełnianie i modyfikowanie wraz ze zmianami zachodzącymi na obszarze jednostek administracji leśnej jest pracochłonne. Aby usprawnić proces gromadzenia danych o lesie, wprowadzane są nowe techniki pozyskiwania danych, takie jak teledetekcja.

Badanie struktury lasów z wykorzystaniem materiałów teledetekcyjnych

W polskim leśnictwie przez wiele lat teledetekcja nie odgrywała znaczącej roli i wykorzystanie metod zdalnych na skalę gospodarczą było znikome, przede wszystkim z powodu tajności materiałów (Piekarski i in., 1993), jak również z uwagi na brak dostępu do specjalistycznego sprzętu fotogrametrycznego i kosztów wykonania zdjęć odpowiadających wymogom technicznym. Pod koniec lat 50. XX wieku wykorzystywano zdjęcia lotnicze do opracowania znacznych powierzchni leśnych, na początku lat 60. powierzchnia leśna inwentaryzowana w ten sposób wzrosła z około 26 tys. ha do około 116 tys. ha, jednak w kolejnych latach zainteresowanie metodami teledetekcji i fotogrametrii malało.

Zalety materiałów teledetekcyjnych wynikają z ich powszechnej dostępności, wysokiej i wciąż ulegającej poprawie jakości. Teledetekcja dostarcza danych uzupełniających i pomocniczych do prac wykonywanych metodami tradycyjnymi, jak również stanowi doskonały materiał dokumentacyjny.

Włączenie teledetekcji w poczet powszechnie wykorzystywanych w leśnictwie metod ma znaczenie z punktu widzenia trendów panujących w leśnictwie światowym (Mozgawa i in., 2000).

Na zdjęciach lotniczych możliwe jest rozróżnianie szczegółów terenowych będących treścią map gospodarczych, a utworzenie modelu stereoskopowego jest podstawą przeprowadzenia pomiarów i interpretacji. Na podstawie analizy stereogramów możliwe do określenia są: zwarcie, formy zmieszania, skład gatunkowy, lokalizacja luk, gniazd i kęp, wysokość drzew, uszkodzenia, liczba drzew na jednostkę powierzchni, lokalizacja użytków ekologicznych.

Nie wszystkie charakterystyki wchodzące w skład opisu taksacyjnego są możliwe do bezpośredniego pomiarzenia bądź zinterpretowania na zdjęciach lotniczych.

Dla celów urzędzeniowych preferuje się zdjęcia lotnicze średnioskalowe panchromatyczne (wykonane w zakresie widma widzialnego na filmie czarno-białym) lub spektrostrefowe (1:7000–1:12 000, w warunkach polskich optymalna skala to 1:8000) w pokryciu stereoskopowym. Najwięcej istotnych informacji niosą zdjęcia panchromatyczne wykonane wiosną (na przełomie kwietnia i maja) i wczesną jesienią (druga połowa października). Natomiast, aby uzyskać maksimum informacji ze zdjęć spektrostrefowych, powinno się je robić w okresie pełnej wegetacji drzew leśnych (czerwiec–sierpień). Zdjęcia w barwach nierzeczywistych zawierają 2–3-krotnie więcej elementów, które wpływają na poprawne przeprowadzenie procesu fotointerpretacji, niż zdjęcia panchromatyczne. Na zdjęciach w barwach nierzeczywistych zarejestrowane są dwa (lub jeden) kanały widma widzialnego i zakres podczerwieni, dzięki czemu roślinność odwzorowana jest w odcieniach purpury, co wynika z silnego odbicia tego promieniowania przez organy asymilacyjne roślin. Dzięki cechom zdjęć spektrostrefowych możliwe jest dokładne wyznaczenie jednorodnych gatunkowo wyłączeń taksacyjnych bez konieczności późniejszej weryfikacji ich granic w terenie (Piekarski, 1998).

Aby uzyskać dokładne charakterystyki drzewostanów, wykorzystuje się zdjęcia wielkoskalowe (1:500–1:2000). Ich zastosowanie umożliwia określenie elementów taksacyjnych z dokładnością zbliżoną do pomiarów wykonywanych w terenie (Piekarski i in., 1993). Zwiększenie skali zdjęć powoduje, że zawarta na nich informacja odnosi się do stosunkowo niewielkiego obszaru, co uniemożliwia precyzyjne wyznaczanie granic wyłączeń drzewostanowych. Zdjęcia wielkoskalowe są wykorzystywane do zakładania powierzchni próbnych.

Teledetekcja oferuje też inne narzędzia (radary, lidary, lasery), które dostarczają wartościowych informacji o strukturze pionowej drzewostanów.

Radary są źródłem cennych danych z uwagi na możliwość rejestracji sygnału bez względu na pogodę, co ma znaczenie w umiarkowanych szerokościach geograficznych. Zastosowanie mikrofal umożliwia penetrację w głąb lasu i zbadanie go w pełnym przekroju pionowym. Na podstawie analiz wartości współczynnika odbicia wstecznego możliwe jest zidentyfikowanie obszarów leśnych oraz bardziej szczegółowe badania – rozróżnianie typów lasu, gatunków drzew i ich parametrów, struktury przestrzennej lasu, jego kondycji i zasobności (Zawiła-Niedźwiecki, 1995). W istotny sposób informację na zdjęciach radarowych wzbogaca tworzenie kompozycji barwnych ze zdjęć danego obszaru wykonanych w różnych terminach (maksymalnie różniących się między sobą, aby zawarte w nich informacje się uzupełniały). Zastosowanie takich kompozycji, których interpretacja jest stosunkowo łatwa, umożliwia wydzielenie drzewostanów zwartych, silnie rozluźnionych, młodników, zrębów i wylesień (Zawiła-Niedźwiecki i in., 1994).

Szczegółowych informacji o lesie dostarczają także lidary, które są źródłem danych o różnych charakterystykach lasów, podobnie jak radary, i uzupełniają je dodatkowo o trzeci wymiar (Lefsky i in., 2002). Lidar szacuje wysokość roślin, podobnie jak inne parametry związane z układem pionowym od wierzchołków drzew do dna lasu, mierząc bezpośrednio strukturę pionową. Jest narzędziem, które służy do kartowania topografii powierzchni roślin. Lidar dostarcza danych o różnej szczegółowości. W zależności od potrzeb, można uzyskać dane na temat pojedynczego drzewa, jak i informacje o rozległych kompleksach leśnych.

Strukturę drzewostanów można także badać posługując się obrazami satelitarnymi, nad którymi rozpoczęto badania w polskim leśnictwie w połowie lat 70. XX wieku. Badania mogą być prowadzone na podstawie wizualnej interpretacji kompozycji barwnych i cyfrowej analizy wartości odbicia spektralnego (Mozgawa i in., 1994). Wiśniewska (2000), klasyfikując scenę z satelity Landsat TM określiła zwarcie, skład gatunkowy, uszkodzenia, klasy bonitacji siedliska i wiek.

Klasyfikacja treści leśnej zdjęć satelitarnych nie jest pozbawiona trudności, szczególnie, jeśli jednoczesnej analizie podlegają kompleksy leśne położone w różnych regionach biogeograficznych. W przypadku badań dotyczących jednego regionu biogeograficznego możliwa jest klasyfikacja o większej szczegółowości (Wiśniewska, Zawiła-Niedźwiecki, 1998).

Korzystnym rozwiązaniem jest stosowanie dwóch rodzajów danych teledetekcyjnych, które zawierają inny rodzaj informacji i wzajemnie się uzupełniają. Przykładem takiej metody jest wykorzystanie zdjęć radarowych ERS-1 w powiązaniu ze zobrazeniem satelitarnym Landsat TM, które są ze sobą słabo skorelowane. Związki pomiędzy obrazami ERS-1 a Landsat TM badano na przykładzie lasów w Sudetach, określając relacje pomiędzy wartościami współczynnika odbicia wstecznego (ERS-1) a poszczególnymi kanałami TM, jak również kanałami wagowanymi (TM5/TM4,

$$TM4/TM3, NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}, \text{ wskaźnikiem jasności}$$

$BR = \sqrt{(TM3)^2 + (TM4)^2}$) i składowymi głównymi. Zdjęcia wykonane w optycznym zakresie widma były uzupełniane przez dane radarowe niosące inny rodzaj informacji o środowisku (Zawiła-Niedźwiecki i in., 1994).

Ramowa metodyka badań

W niniejszej pracy główną metodą analizy jest klasyfikacja nadzorowana, która opiera się na parametrycznych regułach decyzyjnych. Jako metody pomocnicze, służące do wstępnej analizy danych, zastosowano wizualną ocenę materiałów i klasyfikację nie nadzorowaną.

W celu dokonania oceny przydatności zastosowanych danych i prawidłowości przeprowadzonych badań posłużono się dwoma metodami oszacowania dokładności klasyfikacji: macierzą błędów i współczynnikiem Kappa (Congalton, 1991). Analizy te umożliwiają weryfikację

warstw tematycznych otrzymanych w procesie obróbki cyfrowej materiałów teledetekcyjnych.

W celu dokonania oceny naturalności i stopnia przekształcenia przez człowieka analizowanych obszarów, do opisu struktury krajobrazu wykorzystano miary stosowane w ekologii krajobrazu.

Do cyfrowego przetwarzania obrazów wykorzystano program Erdas Imagine 8.3.1, natomiast ilościowy opis struktury krajobrazu uzyskano wykorzystując program Fragstats dostępny w sieci internetowej na stronie <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

Charakterystyka materiałów wykorzystanych w pracy

W pracy zostało wykorzystane zobrazowanie satelitarne Landsat 7 ETM+.

Jako dane pomocnicze zostały użyte mapy topograficzne, które wykorzystano w celu geometrycznego przetworzenia materiałów teledetekcyjnych (geokorekcja). Ponadto posłużono się mapami leśnymi (przeglądowe mapy drzewostanów), które wykorzystano do zweryfikowania poprawności i dokładności przeprowadzonych analiz.

Wykorzystany obraz satelitarny został wykonany dnia 7 maja 2000 r. przez satelitę Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Dla potrzeb pracy wykorzystano trzy fragmenty sceny satelitarnej pokrywającej w sumie obszar o powierzchni 900 km². Tereny badań przedstawiono na rycinach 1, 2 i 3.

Sensor rejestruje sygnał w 7 kanałach spektralnych, spośród których w opracowaniu wykorzystano 6 (tab.1)

Zobrazowanie wielospektralne ma rozdzielczość przestrzenną 30 m.

Obraz satelitarny został wykorzystany do analizy wybranych elementów struktury badanych kompleksów leśnych, jak również do zbadania ich z ekologicznego punktu widzenia z zastosowaniem miar opisujących strukturę krajobrazu leśnego.

Sygnał rejestrowany przez sensor był wypadkową odbicia spektralnego od różnorodnych obiektów i materiałów znajdujących się na powierzchni Ziemi. W przypadku lasów odpowiedzią spektralną była wypadkowa sygnału odbitego od aparatu asymilacyjnego (igły i liście), gałęzi, pni, gleby i roślinności tworzącej niższe piętra w drzewostanie.

Jak wspomniano wyżej, w pracy wykorzystano materiały kartograficzne: mapy topograficzne w układzie współrzędnych „1942” wydane przez Głównego Geodetę Kraju, mapy tematyczne wykonane w Biurze Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej w Warszawie (Kampinoski Park Narodowy i Chojnowski Park Krajobrazowy) oraz na Wydziale Leśnym SGGW (Las Kabacki). Mapy topograficzne zostały wykorzystane w procesie przetwarzania wstępnego materiałów teledetekcyjnych. Do korekcji geometrycznej obrazu satelitarnego użyto map w skali 1: 50 000 (stan aktualności na 1992 r.).

Przeglądowe mapy drzewostanów badanych obszarów przedstawiały stan: Rezerwat Sieraków – 2002 r., Uroczysko Chojnów – 1998 r., Las Kabacki – 1987 r.

Informacje zawarte na mapach leśnych wykorzystano przy wybieraniu pól treningowych do klasyfikacji obrazów i jako dane referencyjne do zweryfikowania poprawności i dokładności przeprowadzonych klasyfikacji.

Tabela 1. Charakterystyka spektralna i wykorzystanie kanałów satelitów Landsat (opracowanie własne na podstawie: Zawiła-Niedźwiecki, 1990; Zwiła-Niedźwiecki i Wiśniewska, 1998; Wiśniewska, 2000).

Table 1. Spectral characteristics and applications of the Landsat satellite channels.

Numer kanału Channel number	Zakres spektralny (µm) Spectral range	Zastosowania Applications
1.	0,45 – 0,52	odróżnianie gleby od roślinności, odróżnianie lasów liściatych od iglastych, wydzielenie drzewostanów (w kompleksach z przewagą sosny) jako osobnych drzewostanów: jodłowych, sosnowych, brzozowych; drzewostanów na siedliskach boru świeżego i boru suchego; zwarcia przerywanego i upraw, wyróżnianie (1, 2, 3) klasy wieku; klas wysokości (0, 1, 4, 5, 6)
2.	0,52 – 0,60	odróżnienie roślinności od obiektów infrastruktury; wydzielenie drzewostanów (w kompleksach z przewagą sosny) jako osobnych drzewostanów jodłowych; drzewostanów na siedliskach boru świeżego i boru suchego; zwarcia przerywanego i upraw, wyróżnianie 1 i 2 klasy wieku; klas wysokości (0, 1, 4)
3.	0,63 – 0,69	rozróżnianie typów roślinności; wydzielenie drzewostanów (w kompleksach z przewagą sosny) jako osobnych drzewostanów: jodłowych, sosnowo-brzozowych i dębowo-olchowych; drzewostanów na siedliskach boru świeżego i boru suchego; zwarcia przerywanego i upraw, wyróżnianie 1 i 2 klasy wieku; klas wysokości (0, 1, 4, 5, 6)
4.	0,76 – 0,90	rozróżnianie typów roślinności; określanie ilości biomasy; badanie kondycji roślinności; wydzielenie drzewostanów (w kompleksach z przewagą sosny) jako osobnych drzewostanów: jodłowych, sosnowych, brzozowych, dębowych, olchowych; drzewostanów na siedliskach boru świeżego, boru suchego, boru wilgotnego, boru mieszanego świeżego, boru mieszanego wilgotnego, lasu mieszanego świeżego; zwarcia przerywanego i upraw; klas wysokości (0, 1, 5, 6)
5.	1,55 – 1,75	określanie zawartości wody w roślinności; wydzielenie drzewostanów (w kompleksach z przewagą sosny) jako osobnych drzewostanów: brzozowych, dębowych i olchowych; drzewostanów na siedliskach boru świeżego, boru wilgotnego, boru mieszanego świeżego, boru mieszanego wilgotnego i lasu mieszanego świeżego; zwarcia przerywanego i upraw; klas wysokości (0, 1, 5, 6)
7.	2,08 – 2,35	badanie wilgotności roślinności; wydzielenie drzewostanów (w kompleksach z przewagą sosny) jako osobnych drzewostanów: jodłowych i sosnowych; drzewostanów na siedliskach boru wilgotnego i boru suchego; zwarcia luźnego i upraw, wyróżnianie 1 klasy wieku; klas wysokości (0 i 1)

Charakterystyka obiektów badań

Ze względu na metodyczny charakter prezentowanej pracy do analizy struktury lasów okolic Warszawy jako tereny testowe wybrano fragmenty trzech kompleksów leśnych różniących się formą ochrony. Kampinoski Park Narodowy (KPN) obejmuje obszar, na którym ochronie podlegają wszystkie elementy przyrody oraz cechy krajobrazu. Jego dostępność dla człowieka jest ograniczona, przez co ma on mniejszy bezpośredni wpływ na kształtowanie się warunków i procesów zachodzących na terenie parku.

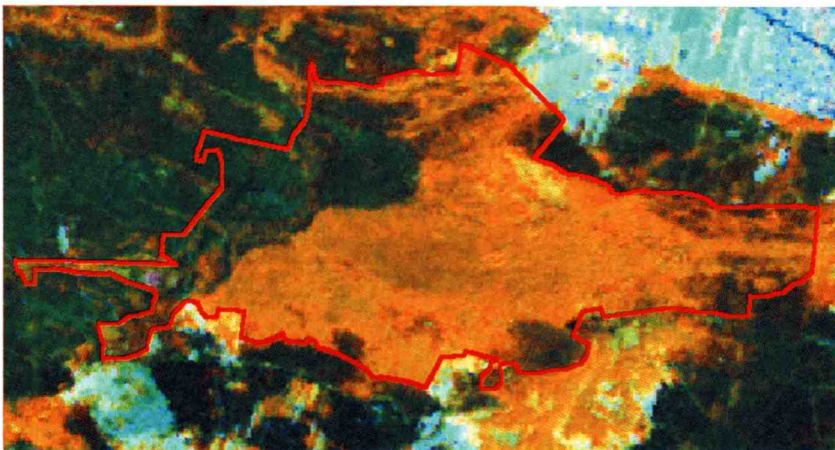
Chojnowski Park Krajobrazowy (ChPK) z założenia chroni przede wszystkim walory krajobrazowe na określonym terenie. Człowiek w znacznie większym stopniu ma możliwość ingerencji w jego środowisko, które ulega przekształcaniu.

Las miejski, którego przykład stanowi Las Kabacki, posiadający status rezerwatu przyrody, ma charakter otwarty dla mieszkańców Warszawy i ulega największej presji ze strony człowieka.

Charakterystykę przyrodniczą obiektów badań przedstawiono poniżej.

Kampinoski Park Narodowy

Największym rezerwatem w KPN jest rezerwat Sieraków, którego walory przyrodnicze i naukowe zauważyli profesor Jadwiga i Roman Kobenzowie, dzięki którym 24 XI 1937 r. utworzono tu rezerwat ścisły i częściowy. Rezerwat znajduje się w północno-wschodniej części Parku w bardzo bliskim sąsiedztwie Warszawy (Łaszek, Sędzińska, 1992). Obecnie obszar rezerwatu wynosi 1205 ha. Jest on bardzo urozmaicony pod względem rzeźby, ponieważ wysokim wydmom parabolicznym, sięgającym 15–20 m wysokości towarzyszą bagienne zagłębienia, co sprzyja występowaniu zróżnicowanych siedlisk leśnych od suchych borów na wydmach przez bory świeże mieszane i lasy do olsów i torfowisk w obniżeniach terenu. Największą powierzchnię w rezerwacie zajmują olsy ba-



Ryc. 1. Obraz satelitarny Landsat 7 ETM+ Rezerwatu Sieraków w Kampinoskim Parku Narodowym, kompozycja TM4 TM3 TM2.

Fig. 1. Sieraków Nature Reserve, colour composite from Landsat ETM+ TM4 TM3 TM2 channels.

gna Cichowąż – 29,9% powierzchni rezerwatu i bory świeże – 17,1%. Do gatunków panujących należą olsza czarna (45%) wraz z brzozą omszoną na terenach podmokłych, gdzie rosną na charakterystycznych kępach sięgających 0,3–0,5 m powyżej powierzchni torfu i sosna zwyczajna (44%) z domieszką dębu szypułkowego na wyniesieniach wydmowych. Tereny sąsiadujące z bagnem porasta las mieszany dębowo-grabowo-sosnowy z domieszką brzozy brodawkowatej, lipy drobnolistnej i jabłoni. Grądy występują wyspowo i reprezentują je takie gatunki jak: dąb szypułkowy, sosna zwyczajna, grab zwyczajny i leszczyna (Plan ochrony Kampinoskiego..., 1992). Powierzchniową strukturę gatunkową na terenie Rezerwatu Sieraków przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Powierzchniowa struktura gatunkowa na terenie Rezerwatu Sieraków (Plan ochrony Kampinoskiego..., 1992).

Table 2. Spatial species structure in the Sieraków Nature Reserve.

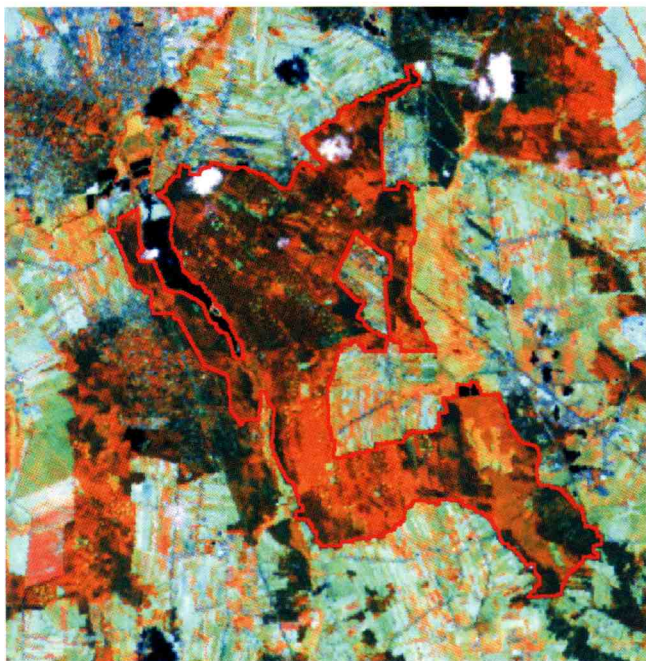
Gatunek drzewa <i>Tree species</i>	Zajmowana powierzchnia Area [ha]	Udział Percentage [%]
olsza czarna <i>alder</i>	491,75	44,90
sosna zwyczajna <i>pine</i>	483,42	44,23
brzoza brodawkowata i omszona <i>birch</i>	79,36	7,25
dąb szypułkowy <i>oak</i>	37,67	3,44
grab zwyczajny <i>hornbeam</i>	1,47	0,13
osika <i>aspen</i>	0,63	0,05

Drzewostany występujące w Rezerwacie Sieraków mają charakter naturalny i osiągnęły wiek średnio 89 lat (najstarsze drzewa reprezentują sosny – 110 lat i dęby – 100 lat, do najmłodszych zaś należą brzozy – 58 lat).

Chojnowski Park Krajobrazowy

Chojnowski Park Krajobrazowy (ChPK) został utworzony 1 VI 1993 r. na mocy rozporządzenia wojewody warszawskiego. Jego powierzchnia wynosi 11 525 ha, w tym otulina stanowi 4727 ha. Ponad 70% powierzchni Parku zajmują silnie rozczłonkowane i nierównomiernie rozmieszczone Lasy Chojnowskie, co jest skutkiem występowania rozrzuconych użytków rolnych wchodzących częściowo w skład otuliny parku. Lasy są skupione głównie w środkowej części ChPK, występują tu największe kompleksy leśne (Łaszek, Ronikier-Dolańska, 1996).

Do najważniejszych gatunków lasotwórczych, zajmujących najwyższy procent ogólnej powierzchni lasów należą: sosna zwyczajna (74,1%), dąb szypułkowy (9,1%), brzoza brodawkowata (8,6%), olsza czarna (5,6%). Łączny udział pozostałych gatunków wynosi 2,6% (tab. 3) Obecnie prowadzona jest



Ryc. 2. Obraz satelitalny Landsat 7 ETM+ Uroczyska Chojnów w Chojnowskim Parku Krajobrazowym, kompozycja TM4 TM3 TM2.

Fig. 2. Chojnów Range, colour composite from Landsat ETM+ TM4 TM3 TM2 channels.

Tabela 3. Powierzchniowa struktura gatunkowa na terenie Chojnowskiego Parku Krajobrazowego (*Plan urządzania...*, 1999).

Table 3. Spatial species structure in the Chojnowski Landscape Park.

Gatunek drzewa <i>Tree species</i>	Zajmowana powierzchnia Area [ha]	Udział Percentage [%]
sosna zwyczajna <i>pine</i>	10927,58	74,10
dąb szypułkowy <i>oak</i>	1341,98	9,10
brzoza brodawkowata <i>birch</i>	1268,25	8,60
olsza czarna <i>alder</i>	825,84	5,60
pozostałe <i>others</i>	383,42	2,60

przebudowa składu gatunkowego drzewostanów, w których przeważała sosna. Wprowadza się gatunki zgodne z siedliskiem (*Plan urządzania lasu...*, 1999).

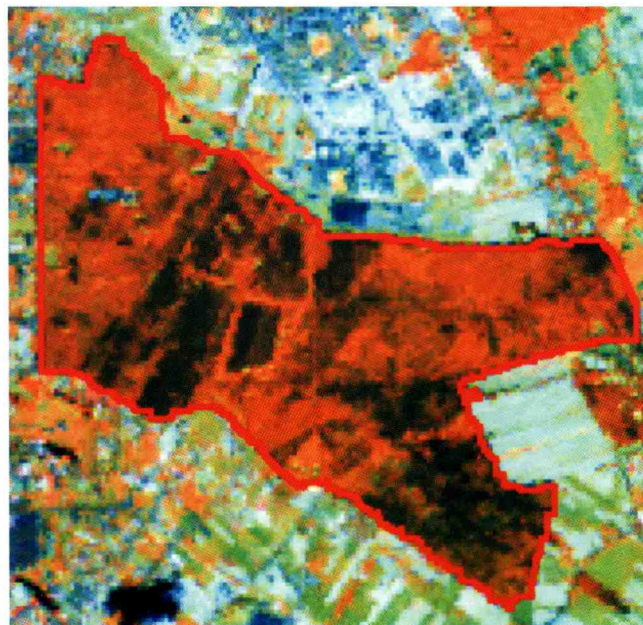
Głównym kompleksem leśnym ChPK jest Uroczysko Chojnów położone na południe od Piaseczna. Ma ono powierzchnię 2166,01 ha. Na jego terenie zlokalizowano dwa rezerваты chroniące szczególnie walory przyrodnicze.

Występują tu niewielkie deniwelacje, a w związku z nimi zmienna wilgotność, która pociąga za sobą występowanie w obniżeniach roślinności zielonej typowej dla łąk, a na wyniesieniach dla borów mieszanych (Łaszek, Ronikier-Dolańska, 1996).

Las Kabacki

Leśny, częściowy rezerwat krajobrazowy Las Kabacki im. Stefana Starzyńskiego został utworzony na podstawie zarządzenia Ministra Leśnictwa i Przemysłu Drzewnego

z dnia 11 VIII 1980 r. Tworzy go jeden kompleks leśny o powierzchni 918,02 ha. Jest on położony w południowej części Warszawy, w gminie Ursynów. Las Kabacki jest częścią Lasów Chojnowskich. Ze względu na swoje położenie i pełnione funkcje, odgrywa przede wszystkim rolę terenu przeznaczonego do rekreacji, jest przy tym narażony na bezpośredni i pośredni wpływ czynników antropogenicznych.



Ryc. 3. Obraz satelitalny Landsat 7 ETM+ Lasu Kabackiego, kompozycja TM4 TM5 TM3.

Fig. 3. Kabaty Forest, colour composite from Landsat ETM+ TM4 TM5 TM3 channels.

W Lesie Kabackim został zachowany zróżnicowany, wielogatunkowy drzewostan, często o charakterze piętrowym i bogatym runie, ale mimo to z uwagi na długi okres niewłaściwego gospodarowania zasobami leśnymi na terenie rezerwatu szata roślinna jest mocno zmieniona i znacznie zubożona. Jednak zachowały się duże obszary porośnięte starodrzewiem 120–160-letnim. W górnym piętrze drzewostanu spotkać można najczęściej sosnę zwyczajną, dąb szypułkowy, brzozę brodawkowatą, osikę, a także lipę drobnolistną, buk, klon zwyczajny, modrzew europejski oraz wiąz górski i jesion wyniosły. Dolne piętro w starych drzewostanach tworzy dąb szypułkowy, lipa drobnolistna, grab zwyczajny, klon zwyczajny, a czasem

Tabela 4. Powierzchniowa struktura gatunkowa na terenie Lasu Kabackiego (*Plan urządzania lasu...*, 1987).

Table 4. Spatial species structure in the Kabaty Forest.

Gatunek drzewa <i>Tree species</i>	Zajmowana powierzchnia Area [ha]	Udział Percentage [%]
sosna zwyczajna <i>pine</i>	427,70	49,20
dąb szypułkowy <i>oak</i>	220,80	25,40
brzoza brodawkowata <i>birch</i>	100,00	11,50
osika <i>aspen</i>	46,94	5,40
grab zwyczajny <i>hornbeam</i>	36,50	4,20
pozostałe <i>others</i>	37,40	4,30

grusza, trześnię i jabłonie (Czerwiński i in., 2003). Powierzchniową strukturę gatunkową na terenie Lasu Kabackiego przedstawia tabela 4.

Badanie wybranych cech drzewostanów z zastosowaniem klasyfikacji nadzorowanej obrazów satelitarnych Landsat ETM+

Klasyfikacji poddano wybrane obszary kompleksów leśnych będących przedmiotem niniejszego opracowania.

Klasyfikację przeprowadzono posługując się regułą największego prawdopodobieństwa. Metoda największego prawdopodobieństwa jest uważana za najdokładniejszą spośród dostępnych metod klasyfikacji pikselowej (Domański, 1998).

Spśród sześciu kanałów optycznych (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7) do analizy wybrano zakres – TM4 uznawany za najlepszy do badań roślinności oraz kanały: TM2, TM3 i TM5, które razem z kanałem TM4 wykorzystano do utworzenia kompozycji barwnych i wskaźników (Wrzesień, 2003).

Analiza kanałów skanera TM pozwoliła na wyselekcjonowanie tych zakresów, które są szczególnie przydatne. Zawila-Niedźwiecki (1990) wskazuje, że TM3, TM4, TM5 i TM7 są szczególnie użyteczne do badań leśnych.

Dokonano wizualnej oceny poszczególnych obrazów i zróżnicowania wartości pikseli, oraz wykresów spektralnych sporządzonych dla badanych gatunków drzew (ryc. 4) i przedziałów klas wieku.

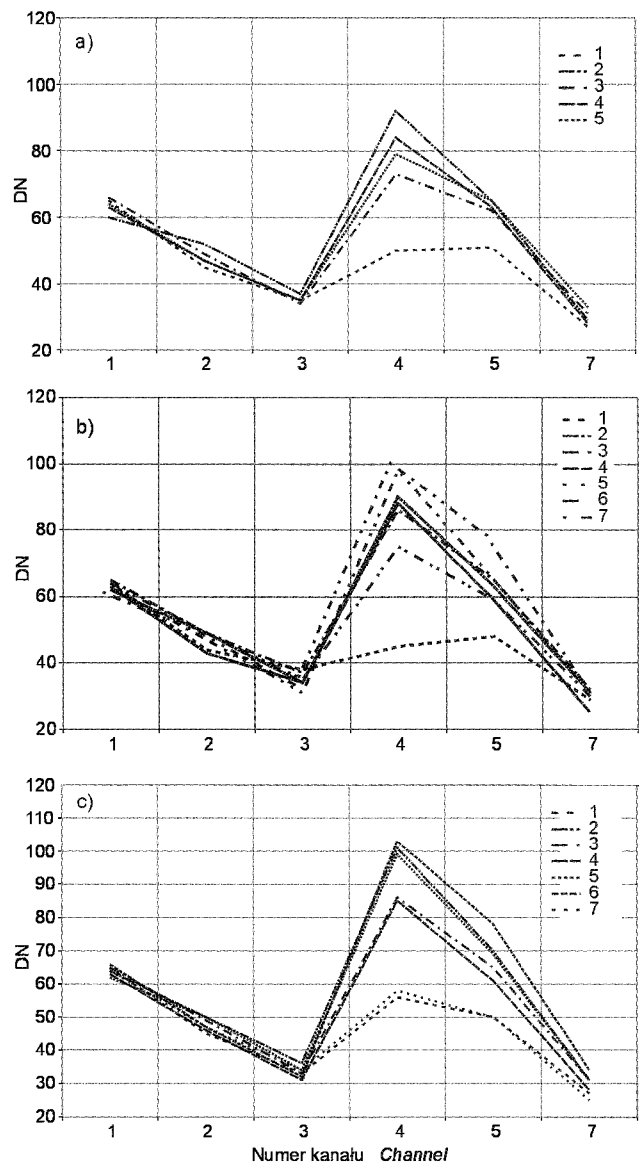
W klasyfikacji wielospektralnej ograniczono się do zestawień kanałów, w których stwierdzono największe zróżnicowanie odbicia spektralnego. W pracy wykorzystano dwa zestawy kanałów TM4 TM3 TM2 i TM4 TM5 TM3.

W celu zdefiniowania klas przeanalizowano przeglądowe mapy drzewostanów i opisy taksacyjne oraz wizualnie oceniono na kompozycjach barwnych RGB TM4 TM3 TM2 i RGB TM4 TM5 TM3 możliwości wydzielenia poszczególnych gatunków i klas wieku. Jako proces przygotowawczy do przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej zastosowano klasyfikację nienadzorowaną, określając na podstawie materiałów źródłowych maksymalną liczbę klas możliwych do wydzielenia (równą ilości wydzieleni na mapie drzewostanów).

Dla Lasu Kabackiego określono pięć klas, spośród których cztery odzwierciedlają skład gatunkowy. Były to: sosna, dąb, brzoza, olsza. Piątą klasę stanowiły fragmenty Lasu Kabackiego pozbawione pokrywy leśnej (polany, zręby, gniazda).

Rezultaty analiz związanych z ustaleniem klas wieku poszczególnych gatunków możliwych do rozróżnienia na obrazie satelitarnym przedstawiono na ryc. 4.

W Lesie Kabackim dla sosny zwyczajnej określono rozmieszczenie drzewostanów zaliczanych do dwóch grup wiekowych. Grupa pierwsza obejmowała bardzo szeroki zakres wieku – od 21 do 100 lat (klasy wieku II do V), a grupa druga obejmowała drzewostany w wieku powyżej 100 lat (klasa VI). Grupa wiekowa do 20 lat (I klasa wieku) nie została wyróżniona z powodu wartości od-



Ryc. 4. Odbicie spektralne różnych gatunków drzew: a) Rezerwat Sieraków: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – grab, 6 – buk, 7 – świerk; b) Uroczysko Chojnów: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – modrzew, 6 – osika, 7 – jesion; c) Las Kabacki: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – grab.

Fig. 4. Reflectance of different tree species: a) Sieraków Nature Reserve: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – hornbeam, 6 – beech, 7 – spruce; b) Chojnów Range: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – larch, 6 – aspen, 7 – ash; c) Kabaty Forest 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – hornbeam.

bicia spektralnego dla młodych sosen zbliżonego do wartości reprezentujących drzewa liściaste.

Jako osobną grupę wiekową dla Rezerwatu Las Kabacki wydzielono drzewostany dębowe w grupach wiekowych analogicznych do sosny.

Dla Lasu Kabackiego końcowy rezultat klasyfikacji obejmował więc dwie grupy wiekowe dla sosny, dwie grupy wiekowe dla dębu, jedną grupę wiekową dla brzozy i olszy oraz fragmenty obszarów leśnych pozbawione drzew – w sumie siedem klas.

W Uroczysku Chojnów leżącym na terenie Chojnowskiego Parku Krajobrazowego zostały zdefiniowane

takie same klasy w podziale na gatunki i klasy wieku, jak dla Rezerwatu Las Kabacki. Wynika to z faktu, że oba kompleksy są położone w niewielkiej odległości od siebie i stanowiły niegdyś całość.

W przypadku Rezerwatu Sieraków wydzielono dla każdego z analizowanych gatunków dwa przedziały wiekowe – od 21 do 100 lat i powyżej 100 lat, co odpowiada klasom wieku II do V oraz VI. W Rezerwacie Sieraków na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego, gdzie dominują gatunki liściaste (olsza czarna i brzoza omszona) wydzielono następujące klasy ze względu na gatunek: brzoza, olsza, dąb oraz sosna. W analizie nie uwzględniono grabu, który ma odbicie spektralne zbliżone do dębu i nie wydziela się jako oddzielna klasa. W analizie zrezygnowano również z osiki ze względu na jej znikomy udział w składzie gatunkowym (por. tab. 2).

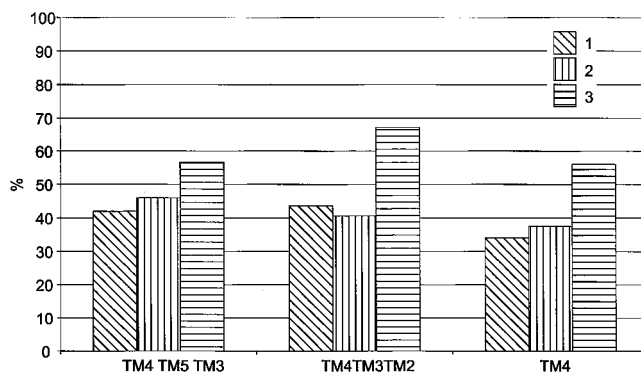
Po zdefiniowaniu klas przystąpiono do tworzenia sygnatur spektralnych dla poszczególnych obszarów. W celu wybrania reprezentatywnych pól treningowych posłużono się mapami drzewostanowymi, co umożliwiło określenie występowania analizowanych gatunków. W większości przypadków w granicach jednorodnego wydzielenia na mapie i na obrazie widoczne było wewnętrzne zróżnicowanie, co uwzględniono tworząc jednorodne poligony testowe. Generowanie poligonów testowych odbywało się za pomocą funkcji Region Growing programu Erdas Imagine, która umożliwia wyszukiwanie pikseli podobnych spektralnie w najbliższym sąsiedztwie wskazanego piksela w zadanej euklidesowej odległości spektralnej 3 pikseli. Dla każdej z klas tworzone sygnatury na podstawie średniej wartości odbicia spektralnego wyliczanego na podstawie poligonów treningowych rozmieszczonych na obrazie.

Rezultaty klasyfikacji obrazów satelitarnych

Efektom przeprowadzonej klasyfikacji nadzorowanej były mapy tematyczne przedstawiające przestrzenną strukturę gatunkową i wiekową analizowanych fragmentów kompleksów leśnych. Obrazy poklasyfikacyjne charakteryzowały się zróżnicowaną dokładnością. Zdecydowanie lepsze wyniki otrzymano dla map przedstawiających zróżnicowanie gatunkowe – uzyskana dokładność klasyfikacji wyniosła od 41,23% do 76,80% (ryc. 5).

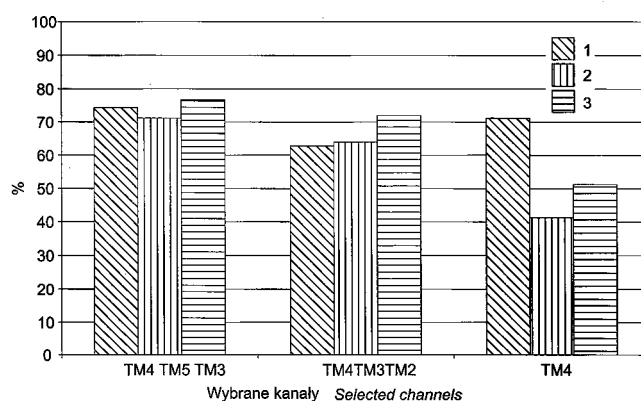
Próba uwzględnienia kategorii wieku wpłynęła na obniżenie wartości całkowitej dokładności klasyfikacji – zakres wyników mieści się w przedziale 34% – 67,19% (ryc. 6).

Las Kabacki będący najmniejszą powierzchniowo jednostką i jednocześnie najbardziej narażoną na wpływ czynników antropogenicznych został sklasyfikowany z największą dokładnością – dla zestawienia kanałów TM4 TM5 TM3 (ryc. 7) uzyskano całkowitą dokładność klasyfikacji struktury gatunkowej 76,80%, natomiast – TM4 TM3 TM2 (ryc. 8) – 72%. Mała powierzchnia kompleksu oraz jego niewielkie zróżnicowanie siedliskowe oraz gatunkowe przyczyniły się do otrzymania dobrego wyniku. Ponadto przeważająca w składzie gatunkowym sosna (49,20%) okazała się obiektem stosunkowo łatwym



Ryc. 5. Całkowita dokładność klasyfikacji struktury gatunkowej 1 – Rezerwat Sieraków, 2 – Uroczysko Chojnów, 3 – Las Kabacki.

Fig. 5. Overall classification accuracy of species structure. 1 – Sieraków Nature Reserve, 2 – Chojnów Range, 3 – Kabaty Forest.



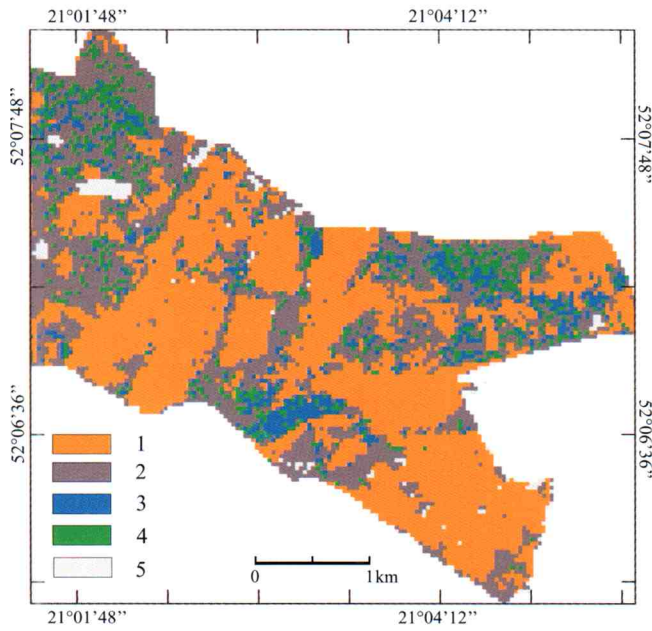
Ryc. 6. Całkowita dokładność klasyfikacji przedziałów klas wieku: 1 – Rezerwat Sieraków 2 – Uroczysko Chojnów 3 – Las Kabacki.

Fig. 6. Overall classification accuracy of mature classes: 1 – Sieraków Nature Reserve, 2 – Chojnów Range, 3 – Kabaty Forest.

do zidentyfikowania na obrazie satelitarnym w sposób automatyczny. Wyraźna różnica pomiędzy wartościami odbicia spektralnego drzew liściastych i iglastych umożliwiła jednoznaczne wyodrębnienie pikseli reprezentujących sosnę. W przypadku drzew liściastych błędy wynikają z nakładania się krzywych spektralnych poszczególnych gatunków. Niektóre piksele reprezentujące dąb zostały wzięte za olszę i brzozę, które także były klasyfikowane jako dąb – drugi pod względem udziału (25,40%) w składzie gatunkowym Lasu Kabackiego.

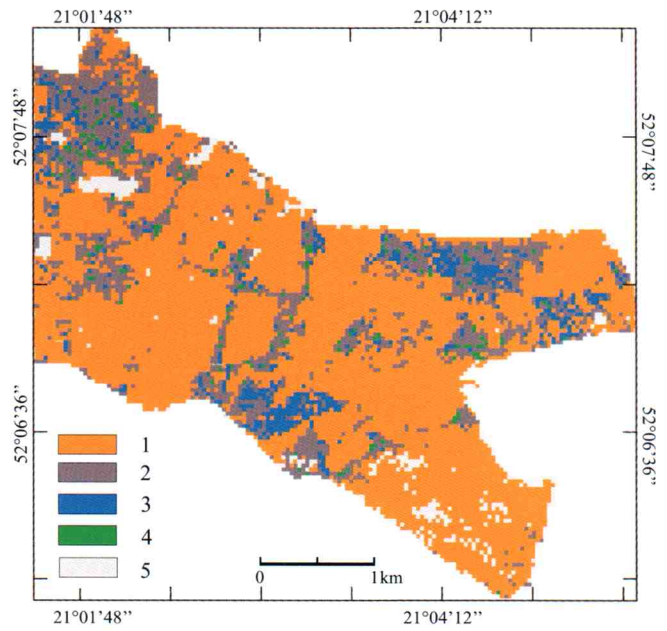
W przypadku klasyfikacji pojedynczego kanału uzyskany wynik to 51,20%, co wynika z faktu, że gatunki liściaste charakteryzujące się zbliżonymi wartościami odbicia spektralnego w kanale TM4 były klasyfikowane błędnie. Korzyścią płynącą z zastosowania kanału podczerwonego okazało się rozróżnienie jako oddzielnej klasy buka, czego nie udało się osiągnąć podczas klasyfikacji trzech kanałów.

Gdy poszczególne gatunki rozdzielono ze względu na wiek, dokładność klasyfikacji obniżyła się. Najlepsze rezultaty, otrzymano dla kanałów TM4 TM3 TM2 (ryc. 10) – 67,19% oraz TM4 TM5 TM3 (ryc. 11) – 56,80%, ponadto wysoką wartość uzyskano dla pojedynczego kanału TM4 (ryc. 12) – 56,10%. Słabsze wyniki zostały spowodowane



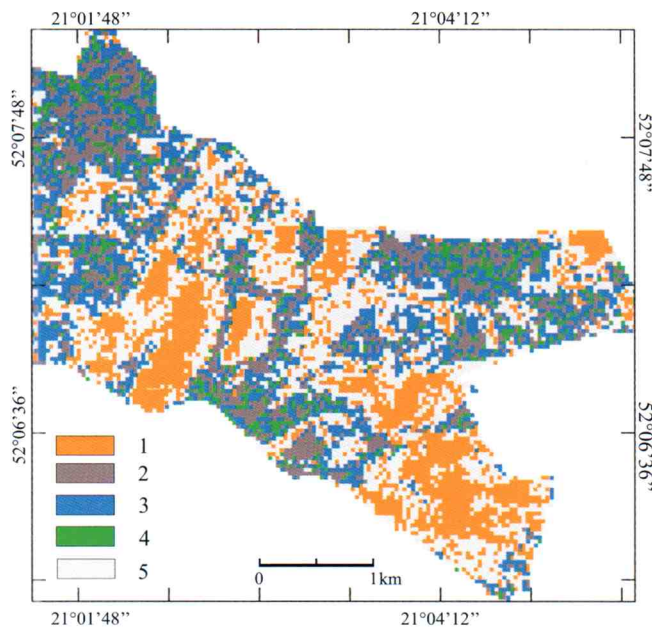
Ryc. 7. Struktura gatunkowa drzewostanów w Lesie Kabackim na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM5 TM3: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – obszary niezalesione.

Fig. 7. Tree species structure in the Kabaty Forest based on classification of Landsat TM4 TM5 TM3 channels: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – non forested area.



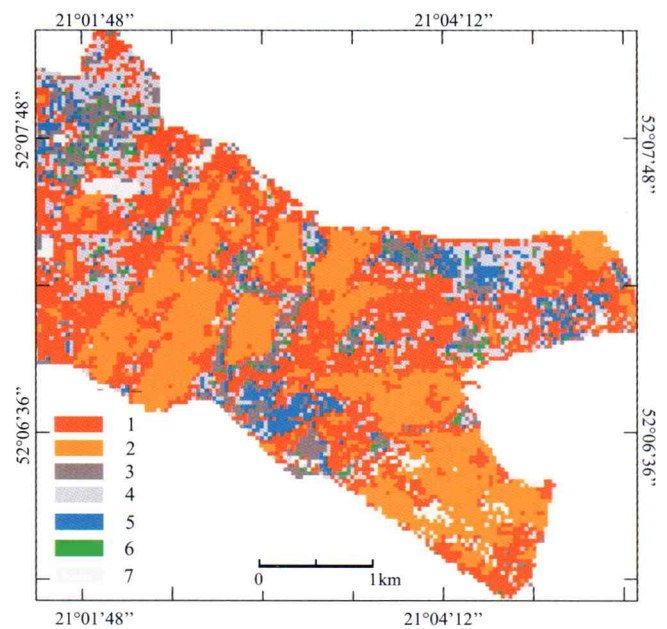
Ryc. 8. Struktura gatunkowa drzewostanów w Lesie Kabackim na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM3 TM2: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – obszary niezalesione.

Fig. 8. Tree species structure in the Kabaty Forest based on classification of Landsat TM4 TM3 TM2 channels: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – non forested area.



Ryc. 9. Struktura gatunkowa drzewostanów w Lesie Kabackim na podstawie klasyfikacji kanału TM4: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – obszary niezalesione.

Fig. 9. Tree species structure in the Kabaty Forest based on classification of Landsat TM4 channel: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – non forested area.



Ryc. 10. Struktura wiekowa drzewostanów w Lesie Kabackim na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM3 TM2: 1 – sosna VI, 2 – sosna II-V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II-V, 5 – brzoza II-V, 6 – olsza II-V, 7 – obszary niezalesione.

Fig. 10. Tree maturity structure in the Kabaty Forest based on classification of Landsat TM4 TM3 TM2 channels: 1 – pine VI, 2 – pine II-V, 3 – oak VI, 4 – oak II-V, 5 – birch II-V, 6 – alder II-V, 7 – non forested area.

przez zbliżone wartości pikseli odpowiadających VI klasie wieku sosny i drzew iglastych w przedziale wiekowym 21–100 lat. Błędnie zaklasyfikowane piksele były zlokalizowane na obszarach, gdzie istotny procent w drzewostanie liściastym stanowi sosna, obniżając w ten sposób wartości pikseli, jak również w przypadku, gdy w drzewostanie sosnowym domieszkę stanowią gatunki liściaste.

Podobne prawidłowości zaobserwowano dla Uroczyska Chojnów. Najdokładniej sklasyfikowano zestawienie kanałów TM4 TM5 TM3 (ryc. 13) – całkowita dokładność klasyfikacji wyniosła 71,20%, co jest wynikiem niższym niż dla Lasu Kabackiego. Kompozycja TM4 TM3 TM2 (ryc. 14) dała także słabsze rezultaty – 64,04%, natomiast całkowita dokładność klasyfikacji kanału TM4 (ryc.15) zaledwie 41,23%. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem różnorodności siedliskowej dokładność klasyfikacji maleje. Na terenie ChPK występują siedliska borowe, lasowe oraz olsowe. Zmienność warunków przyrodniczych odzwierciedla się w drzewostanach i ich kondycji. Sosna jest dominującym gatunkiem w drzewostanach ChPK (74,10%), podczas gdy przeważającą powierzchnię zajmuje siedlisko lasu mieszanego świeżego (35,40%). Drzewa zajmujące siedliska niezgodne z ich wymaganiami (nasadzenia sosnowe) reprezentują większą zmienność odbicia spektralnego. Ponadto w lasach sosnowych na siedliskach innych niż borowe w sposób naturalny wkraczają gatunki liściaste tworzące drugie piętro, które wyraźnie zaznacza swój udział w odpowiedzi spektralnej, zwiększając wartości pikseli, szczególnie na obszarach zajmowanych przez ponadstuletnie sosny.

W przypadku analizy wieku w Uroczysku Chojnów wyniki także były słabsze. Kanały TM4 TM5 TM3 (ryc. 17) dały ponownie najlepszy rezultat – 46%, zestawienie kanałów TM4 TM3 TM2 (ryc. 16) – 40,67%, a TM4 (ryc. 18) – 37,50%. Niska dokładność wynika z trudności z wyodrębnieniem pikseli reprezentujących gatunki liściaste, jak również błędnego klasyfikowania sosny w VI klasie wieku jako dębu (II–V), olsy i brzozy.

Zgodnie z oczekiwaniami w Rezerwacie Sieraków najwyższe wartości całkowitej dokładności klasyfikacji otrzymano dla kanałów TM4 TM5 TM3 (ryc. 19) – 74,40% oraz TM4 (ryc. 20) – 71,20%. Nieco słabszy wynik – 62,90% – uzyskano dla zestawu kanałów TM4 TM3 TM2 (ryc. 21). Lepszy wynik klasyfikacji pojedynczego kanału jest spowodowany faktem, że w drzewostanach Rezerwatu Sieraków dominującym gatunkiem jest olsza (44,90%), a wraz z innymi gatunkami liściastymi (brzoza, dąb, grab i osika) przeważający udział w drzewostanie mają drzewa liściaste, które stosunkowo dobrze różnicują się w kanale podczerwonym. Istotnym czynnikiem może być zgodność siedliska z gatunkiem na nim występującym. W Parku Narodowym, gdzie ingerencja człowieka jest ograniczona do minimum roślinność wkracza w sposób naturalny i zasiedla obszary, które są zgodne z jej wymaganiami.

W przypadku analizy struktury wiekowej uzyskano słabsze wyniki. Najlepiej wiek drzewostanów oddała kompozycja TM4 TM3 TM2 (ryc. 22) – 43,64%, następnie TM4 TM5 TM3 (ryc. 23) – 42,00% oraz najslabiej kanał TM4 (ryc. 24) – 34%. W przypadku klas wieku trudności

występowały w poprawnym przypisywaniu pikseli reprezentujących gatunki liściaste. Brzoza i dąb były klasyfikowane jako olsza, dominująca w Rezerwacie Sieraków. Ponadto błędy występowały na obszarach, gdzie jako domieszka istotny procent w drzewostanie stanowiła sosna.

Z analizy macierzy błędów wynika, że najlepsze kanały do klasyfikacji obszarów leśnych to TM4, TM5, TM3. Na wyniki klasyfikacji istotny wpływ ma udział sosny w drzewostanach, jak również udział gatunków liściastych oraz powierzchnia przez nie zajmowana. Zdecydowanie lepsze wyniki uzyskano określając strukturę gatunkową. Automatyczna klasyfikacja okazała się narzędziem nieskutecznym przy wydzieleniu klas wieku.

Analiza krajobrazu leśnego z wykorzystaniem wskaźników z ekologii krajobrazu

Program Fragstats powstał na Uniwersytecie w Oregonie jako narzędzie do wyrażania w formie ilościowej struktury krajobrazu (McGarigal, Marks, 1995). Dzięki niemu możliwe jest policzenie szeregu indeksów opisujących krajobraz, jak i poszczególne klasy jako składowe analizowanego krajobrazu. Wybrane wskaźniki ilustrują różnorodność badanego obszaru. Na podstawie danych ilustrujących strukturę krajobrazu z ekologicznego punktu widzenia można wnioskować o jego funkcjach i kierunkach zachodzących zmian.

Miary stosowane w programie odnoszą się do poziomu pojedynczego elementu (w przypadku analizy materiałów teledetekcyjnych jest to piksel), klasy i całego krajobrazu, ilustrują kompozycję i konfigurację krajobrazu. W niniejszym opracowaniu skupiono się na wskaźnikach opisujących płyty krajobrazowe.

Miary powierzchniowe

Do wskaźników odnoszących się do powierzchni, przedstawiających kompozycję krajobrazu należą:

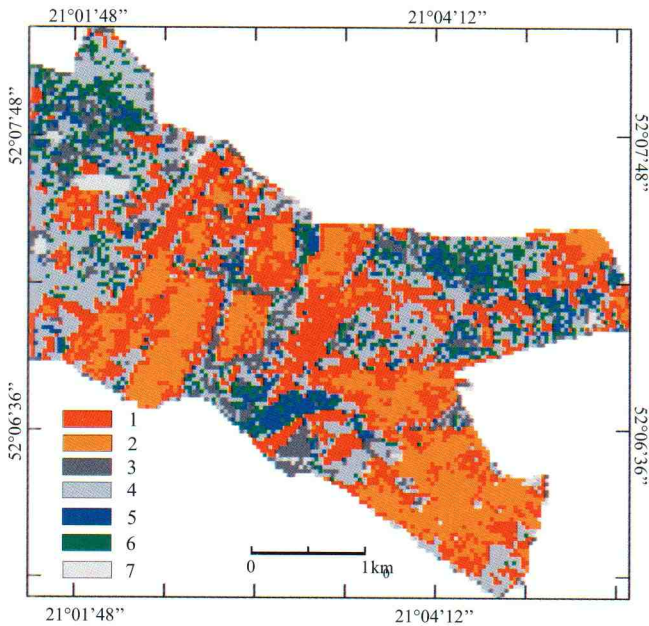
- powierzchnia zajmowana przez daną klasę – *CA* (*Class Area*), lub krajobraz – *TA* (*Total Area*) wyrażana w ha, jest uważana za jeden z najważniejszych wskaźników, mówi o tym, jaką część krajobrazu zajmuje dana klasa. Taka informacja jest istotna z ekologicznego punktu widzenia. Określone klasy reprezentują specyficzne siedlisko, co jest istotne zarówno dla roślin, jak i różnych gatunków zwierząt potrzebujących odpowiednio dużej przestrzeni życiowej.

$$\text{– na poziomie płatu: } CA = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right)$$

$$\text{– na poziomie krajobrazu: } TA = A \left(\frac{1}{10000} \right)$$

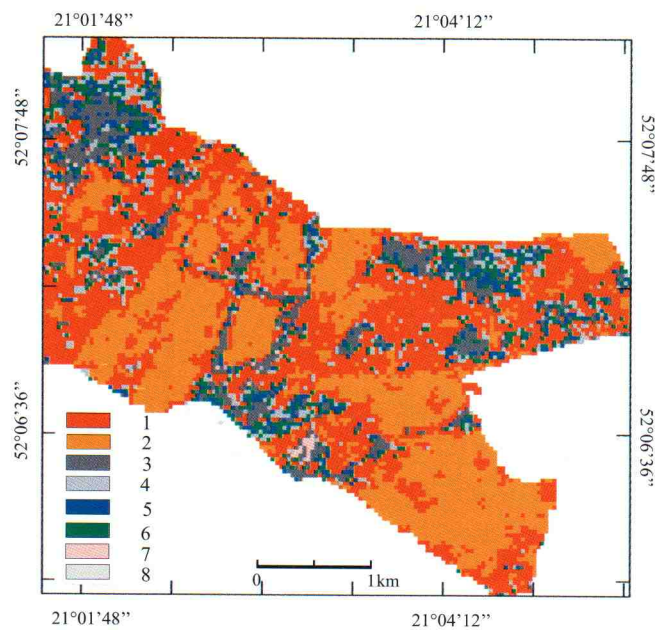
- wskaźnik największej jednostki – *LPI* (*Largest Patch Index*) wyrażony w %, opisuje zróżnicowanie krajobrazu poprzez wyrażenie, jaki udział w krajobrazie ma płat o największej powierzchni należący do danej klasy $\max(\alpha_{ij})$.

$$LPI = \frac{j=1}{A} (100)$$



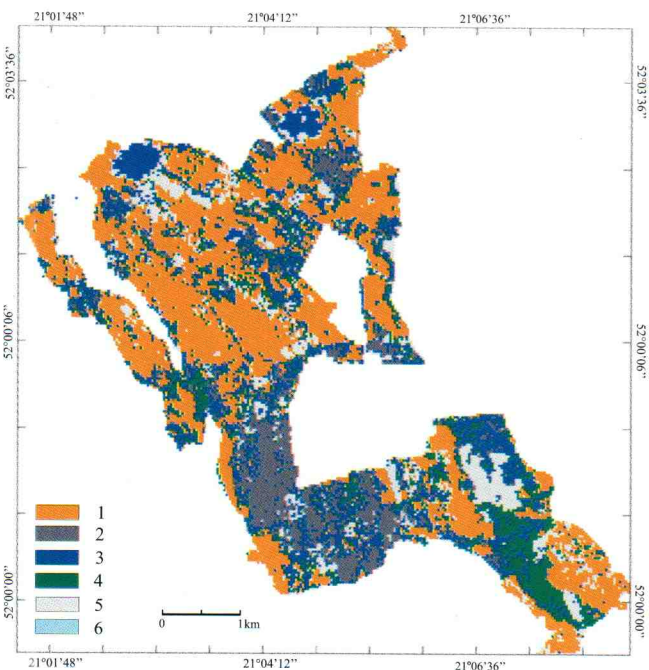
Ryc. 11. Struktura wiekowa drzewostanów w Lesie Kabackim na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM5 TM3: 1 – sosna VI, 2 – sosna II–V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II–V, 5 – brzoza II–V, 6 – olsza II–V, 7 – obszary nie zalesione.

Fig. 11. Tree maturity structure in the Kabaty Forest based on classification of Landsat TM4 TM5 TM3 channels: 1 – pine VI, 2 – pine II–V, 3 – oak VI, 4 – oak II–V, 5 – birch II–V, 6 – alder II–V, 7 – non forested area.



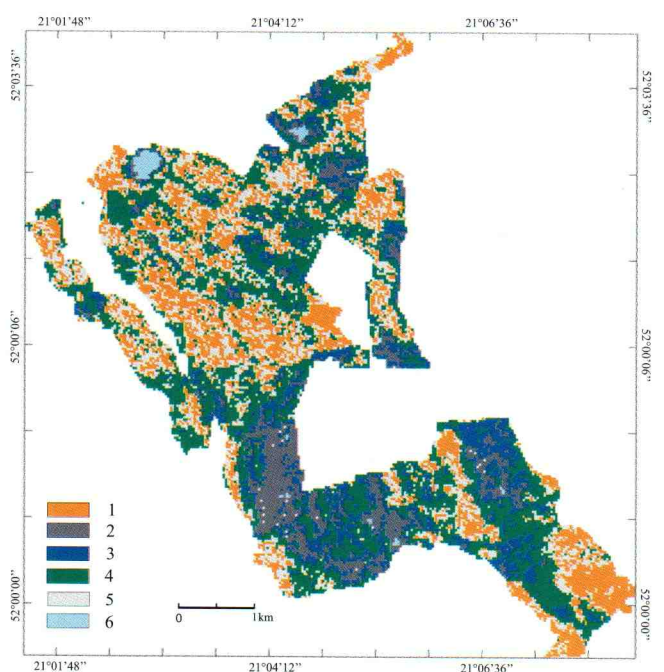
Ryc. 12. Struktura wiekowa drzewostanów w Lesie Kabackim na podstawie klasyfikacji kanału TM4: 1 – sosna VI, 2 – sosna II–V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II–V, 5 – brzoza II–V, 6 – olsza II–V, 7 – buk VI, 8 – obszary nie zalesione.

Fig. 12. Tree maturity structure in the Kabaty Forest based on classification of Landsat TM4 channel: 1 – pine VI, 2 – pine II–V, 3 – oak VI, 4 – oak II–V, 5 – birch II–V, 6 – alder II–V, 7 – beech VI, 8 – non forested area.



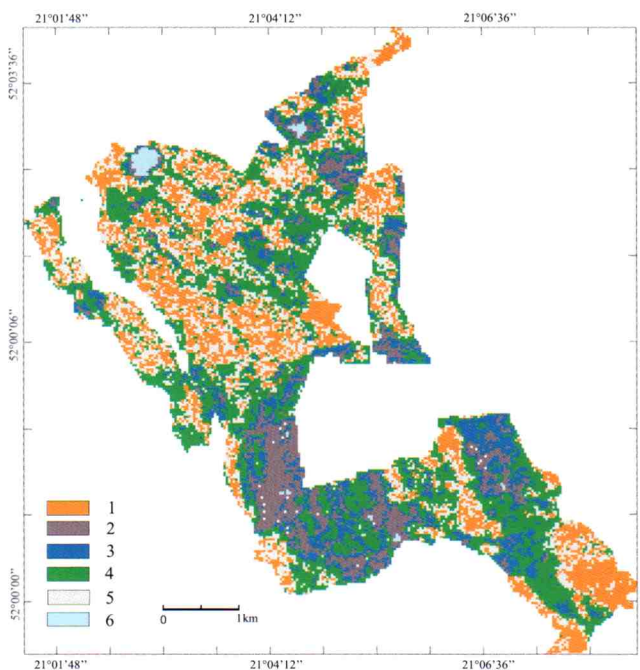
Ryc. 13. Struktura gatunkowa drzewostanów w Uroczysku Chojnow na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM5 TM3: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – obszary nie zalesione, 6 – chmura.

Fig. 13. Tree species structure in the Chojnow Range based on classification of Landsat TM4 TM5 TM3 channels: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – non forested area, 6 – cloud.



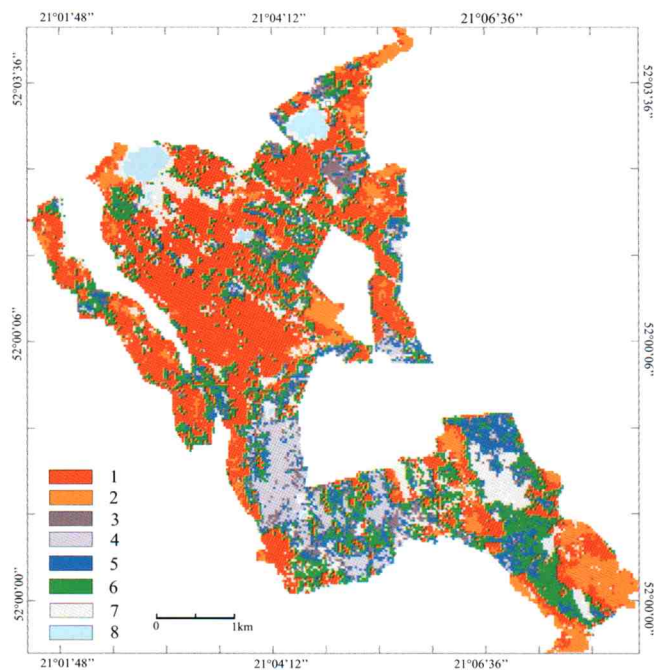
Ryc. 14. Struktura gatunkowa drzewostanów w Uroczysku Chojnow na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM3 TM2: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – obszary nie zalesione, 6 – chmura.

Fig. 14. Tree species structure in the Chojnow Range based on classification of Landsat TM4 TM3 TM2 channels: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – non forested area, 6 – cloud.



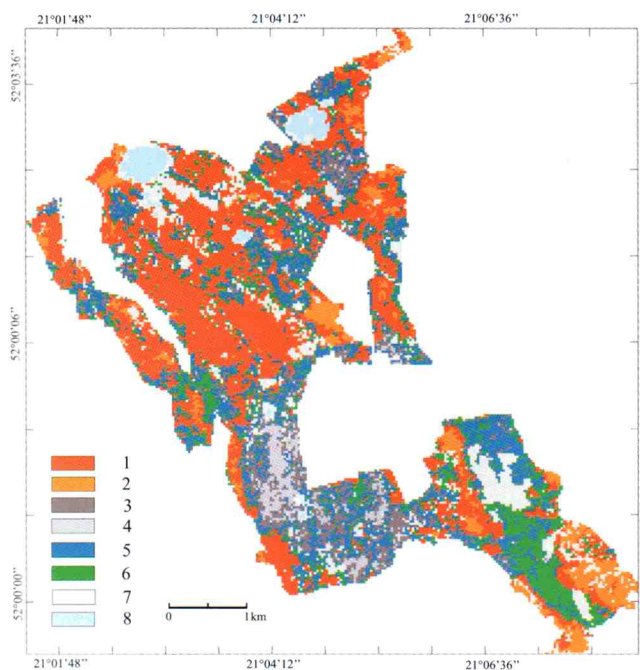
Ryc. 15. Struktura gatunkowa drzewostanów w Uroczysku Chojnów na podstawie klasyfikacji kanału TM4: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza, 5 – obszary nie zalesionem 6 – chmura.

Fig. 15. Tree species structure in the Chojnów Range based on classification of Landsat TM4 channel: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder, 5 – non forested, area 6 – cloud.



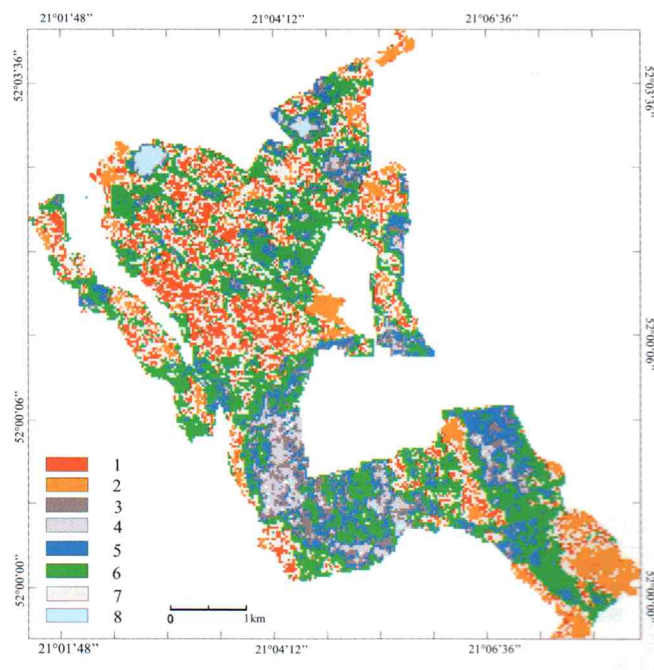
Ryc. 16. Struktura wiekowa drzewostanów w Uroczysku Chojnów na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM3 TM2: 1 – sosna VI, 2 – sosna II-V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II-V, 5 – brzoza II-V, 6 – olsza II-V.

Fig. 16. Tree maturity structure in the Chojnów Range based on classification of Landsat TM4 TM3 TM2 channels: 1 – pine VI, 2 – pine II-V, 3 – oak VI, 4 – oak II-V, 5 – birch II-V, 6 – alder II-V.



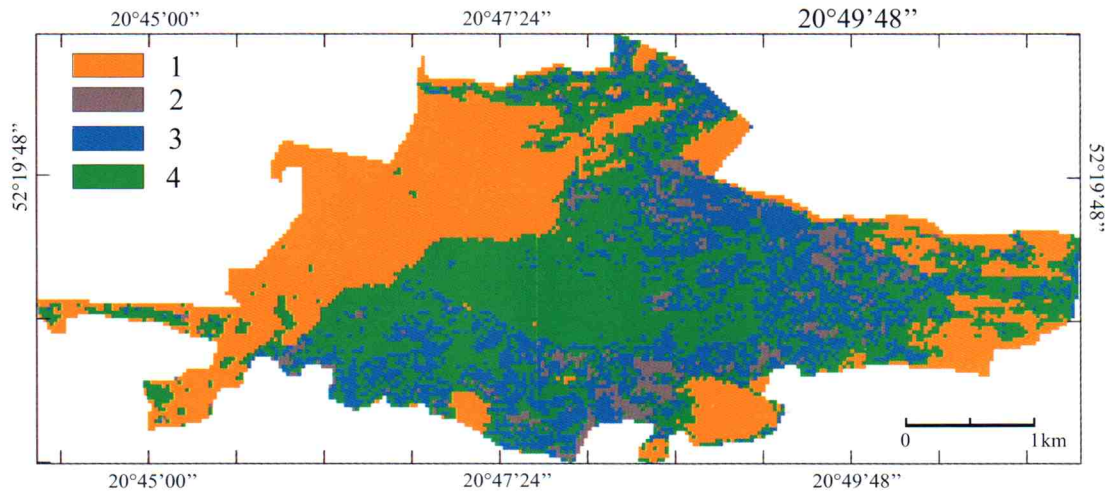
Ryc. 17. Struktura wiekowa drzewostanów w Uroczysku Chojnów na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM5 TM3: 1 – sosna VI, 2 – sosna II-V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II-V, 5 – brzoza II-V, 6 – olsza II-V.

Fig. 17. Tree maturity structure in the Chojnów Range based on classification of Landsat TM4 TM5 TM3 channels: 1 – pine VI, 2 – pine II-V, 3 – oak VI, 4 – oak II-V, 5 – birch II-V, 6 – alder II-V.



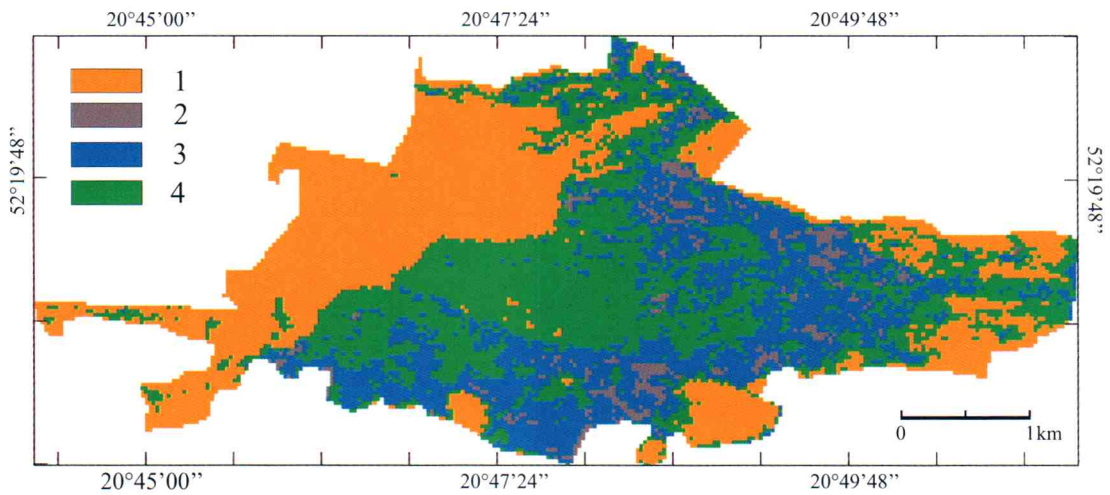
Ryc. 18. Struktura wiekowa drzewostanów w Uroczysku Chojnów na podstawie klasyfikacji kanału TM4: 1 – sosna VI, 2 – sosna II-V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II-V, 5 – brzoza II-V, 6 – olsza II-V.

Fig. 18. Tree maturity structure in the Chojnów Range based on classification of Landsat TM4 channel: 1 – pine VI, 2 – pine II-V, 3 – oak VI, 4 – oak II-V, 5 – birch II-V, 6 – alder II-V.S



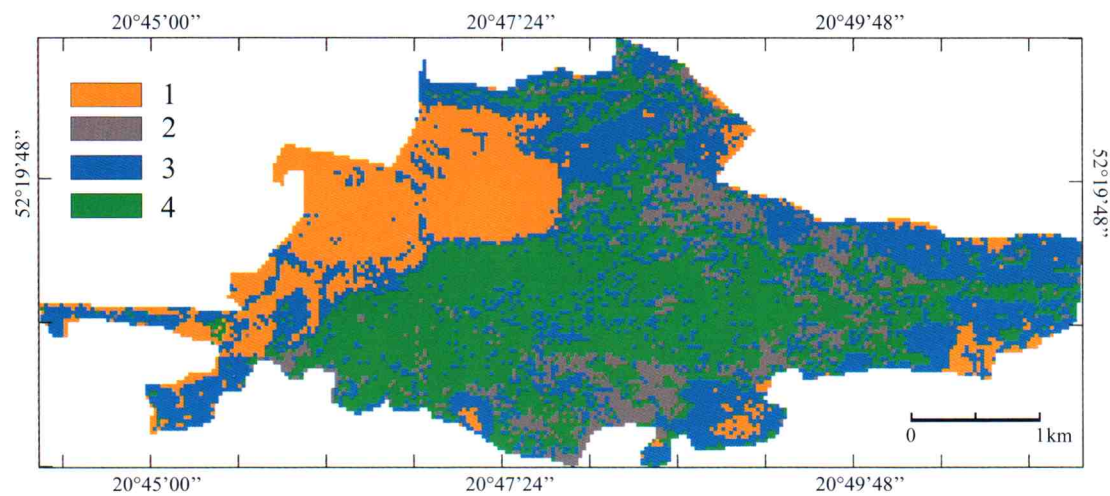
Ryc. 19. Struktura gatunkowa drzewostanów w Rezerwacie Sieraków na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM5 TM3: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza.

Fig. 19. Tree species structure in the Sieraków Nature Reserve based on classification of Landsat TM4 TM5 TM3 channels: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder.



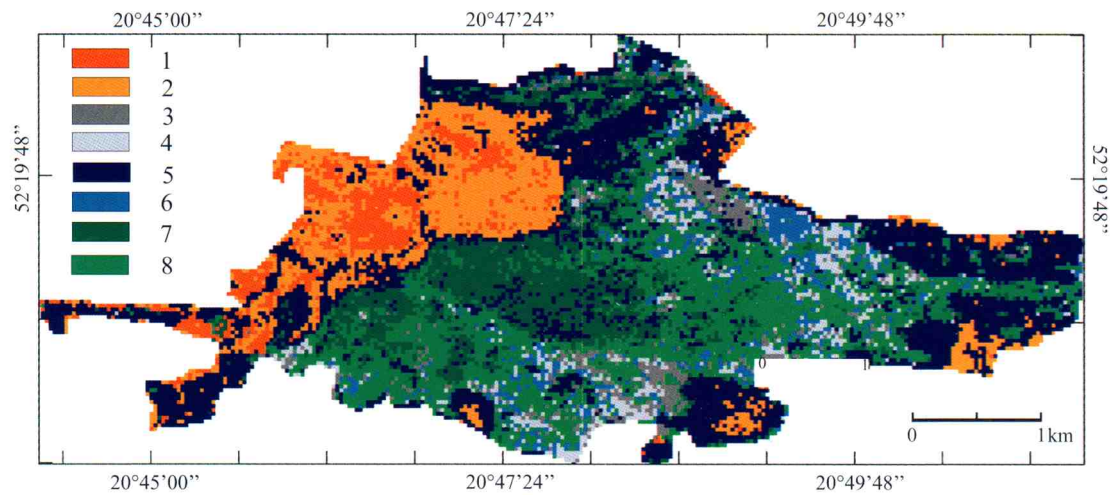
Ryc. 20. Struktura gatunkowa drzewostanów w Rezerwacie Sieraków na podstawie klasyfikacji kanału TM4: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza.

Fig. 20. Tree species structure in the Sieraków Nature Reserve based on classification of Landsat TM4 channel: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder.



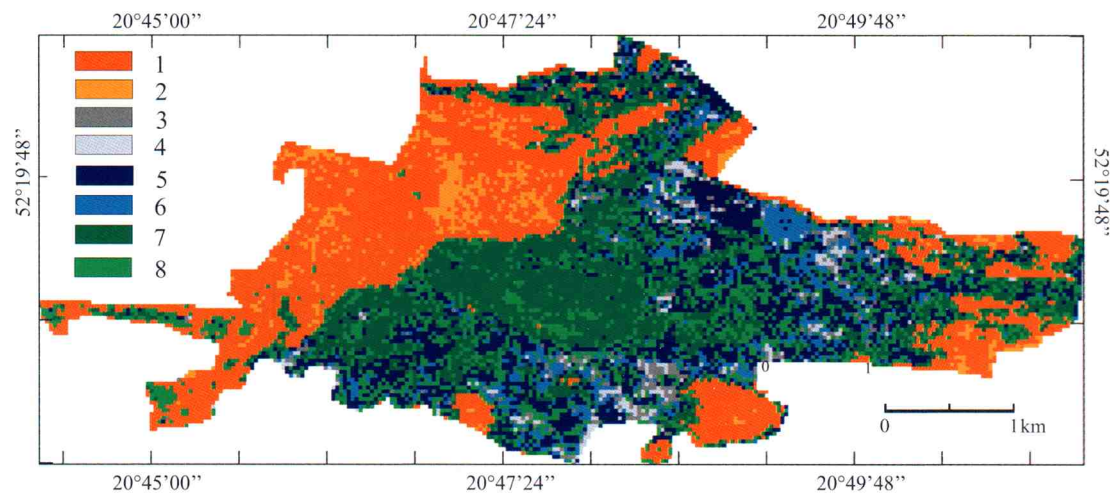
Ryc. 21. Struktura gatunkowa drzewostanów w Rezerwacie Sieraków na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM3 TM2: 1 – sosna, 2 – dąb, 3 – brzoza, 4 – olsza.

Fig. 21. Tree species structure in the Sieraków Nature Reserve based on classification of Landsat TM4 TM3 TM2 channels: 1 – pine, 2 – oak, 3 – birch, 4 – alder.



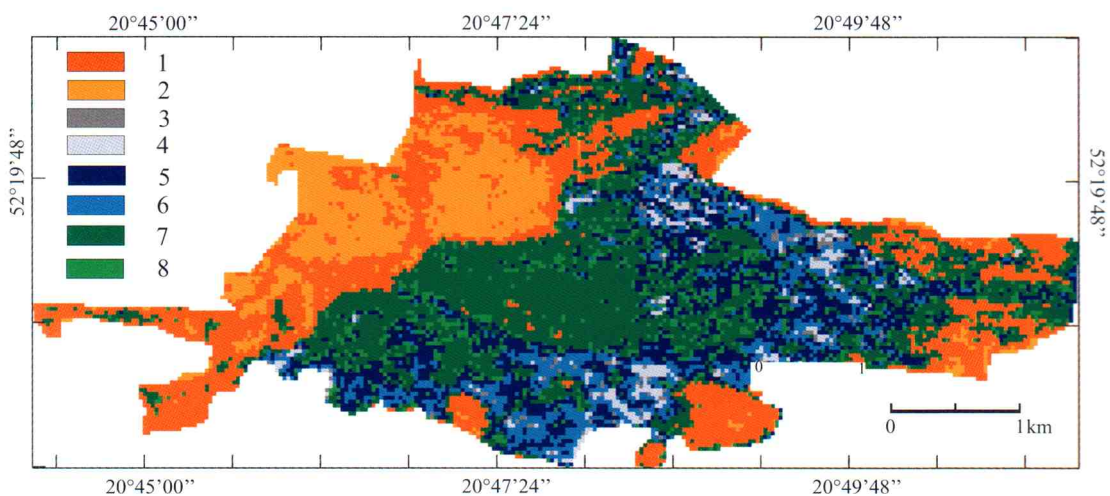
Ryc. 22. Struktura wiekowa drzewostanów w Rezerwacie Sieraków na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM3 TM2: 1 – sosna VI, 2 – sosna II–V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II–V, 5 – brzoza VI, 6 – brzoza II–V, 7 – olsza VI, 8 – olsza II–V.

Fig. 22. Tree maturity structure in the Sieraków Nature Reserve based on classification of Landsat TM4 TM3 TM2 channels: 1 – pine VI, 2 – pine II–V, 3 – oak VI, 4 – oak II–V, 5 – birch VI, 6 – birch II–V, 7 – alder VI, 8 – alder II–V.



Ryc. 23. Struktura wiekowa drzewostanów w Rezerwacie Sieraków na podstawie klasyfikacji kanałów TM4 TM5 TM3: 1 – sosna VI, 2 – sosna II–V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II–V, 5 – brzoza VI, 6 – brzoza II–V, 7 – olsza VI, 8 – olsza II–V.

Fig. 23. Tree maturity structure in the Sieraków Nature Reserve based on classification of Landsat TM4 TM5 TM3 channels: 1 – pine VI, 2 – pine II–V, 3 – oak VI, 4 – oak II–V, 5 – birch VI, 6 – birch II–V, 7 – alder VI, 8 – alder II–V.



Ryc. 24. Struktura wiekowa drzewostanów w Rezerwacie Sieraków na podstawie klasyfikacji kanału TM4: 1 – sosna VI, 2 – sosna II–V, 3 – dąb VI, 4 – dąb II–V, 5 – brzoza VI, 6 – brzoza II–V, 7 – olsza aaVI, 8 – olsza II–V.

Fig. 24. Tree maturity structure in the Sieraków Nature Reserve based on classification of Landsat TM4 channel: 1 – pine VI, 2 – pine II–V, 3 – oak VI, 4 – oak II–V, 5 – birch VI, 6 – birch II–V, 7 – alder VI, 8 – alder II–V.

Miary różnorodności

Urozmaicenie krajobrazu jest utożsamiane z jego bogactwem, więc także z ilością występujących w nim rodzajów pokrycia terenu, sposobem ich rozmieszczenia i udziałem w tworzeniu krajobrazu.

• liczba płatów – *NP* (*Number of Patches*) mówiąca z ilu jednostek składa się badany krajobraz (przyjmuje wartości od 1 do $+\infty$), co wpływa na tempo rozprzestrzeniania się gatunków oraz różnego typu zagrożeń, np. pożarów lub szkodników, jak również mówi o heterogeniczności analizowanego obszaru:

- na poziomie płatu: $NP = n_i$
- na poziomie krajobrazu: $NP = N$

• zagęszczenie jednostek – *PD* (*Patch Density*) opisuje, ile klas jednego typu znajduje się na określonej powierzchni (czyli na 100 ha i zawiera się w przedziale 0; $+\infty$), indeks ten mówi o rozczłonkowaniu krajobrazu:

- na poziomie płatu: $PD = \frac{n_i}{A}(10000)(100)$
- na poziomie krajobrazu: $PD = \frac{N}{A}(10000)(100)$

• bogactwo płatów – *PR* (*Patch Richness*) zawiera się w przedziale $<1; +\infty$)

$$PR = m$$

Kształt

Konfiguracja krajobrazu jest wyrażana poprzez kształt poszczególnych jednostek, budujących krajobraz.

• wymiar fraktalny – *FRAC* (*Fractal Dimension*) mówi o stopniu skomplikowania obwodu jednostki, co pokazuje poprzez porównanie długości granic jednostki do jej powierzchni. Wartości wskaźnika osiągają 1, gdy granica jest prosta i jednowymiarowa, a 2, gdy skomplikowanie linii zbliża się do wymiaru przestrzeni. Urozmaicone kontury wskazują na możliwość graniczenia z większą liczbą sąsiadów.

$$PAFRAC = \frac{2 \left[n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \times \ln a_{ij} \right] - \left[\left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right) \left(\sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right) \right]}{\left(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2}$$

• wskaźnik kształtu – *LSI* (*Landscape Shape Index*) opisuje kształt poprzez porównanie jednostki do kształtu idealnego, jakim w przypadku rastra jest kwadrat. Indeks zawiera się w przedziale $<1, +\infty$).

- na poziomie płatu: $LSI = \frac{0,25 \sum_{k=1}^m e_{ik}}{\sqrt{A}}$

$$\text{na poziomie krajobrazu: } LSI = \frac{0,25E}{\sqrt{A}}$$

Sąsiedztwo

Miary sąsiedztwa informują o układzie krajobrazu. Informacja o wzajemnym ułożeniu płatów umożliwia badanie związków pomiędzy nimi. Miary opisujące sąsiedztwo mogą być wykorzystane do opisu możliwości migracji gatunków i interakcji między odseparowanymi od siebie populacjami.

• średnia odległość do najbliższego sąsiada tego samego typu – *MNN* (*Mean Nearest Neighbour Distance*) także pokazuje zróżnicowanie w krajobrazie poprzez opisanie dystrybucji jednostek danego typu. Osiąga wartości od 0 do $+\infty$.

$$MNN = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{n_i}$$

• lokalizacja – *IJI* (*Interspersion and Juxtaposition Index*) mówi o tym, z iloma sąsiadami graniczy dana jednostka, uwzględniając przy tym długość granicy. Osiąga wartość 0, gdy dany płat przylega tylko do jednej jednostki innego typu, a 100, gdy w równym stopniu sąsiaduje z innymi płatami:

– na poziomie płatu:

$$IJI = \frac{-\sum_{k=1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \ln \left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \right]}{\ln(m-1)} \quad (100)$$

– na poziomie krajobrazu:

$$IJI = \frac{-\sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \circ \ln \left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \right]}{\ln \left(\frac{1}{2} [m(m-1)] \right)}$$

Entropia

Informacja jako właściwość materii może być utożsamiana ze zróżnicowaniem (Richling, Solon, 1992). Miarą informacji jest entropia opisująca nieuporządkowanie układu.

• entropia – *SHDI* (*Shannon's Diversity Index*) to wskaźnik oparty na teorii informacji. Może przyjmować wartości w przedziale $<0; +\infty$). Wskaźnik przyjmuje wartość 0, jeśli krajobraz składa się tylko z jednego rodzaju jednostek, czyli nie jest zróżnicowany, wzrasta, gdy liczba płatów różnego typu jest większa.

$$SHDI = -\sum_{i=1}^m (P_i \circ \ln P_i)$$

gdzie:

a_{ij} – powierzchnia [m^2] klasy ij

A – powierzchnia krajobrazu [m^2]

n_i – liczba płatów danego typu

n_i – liczba płatów typu i w krajobrazie mających najbliższego sąsiada

N – całkowita liczba płatów

P_i – proporcja krajobrazu zajmowana przez klasę i

e_{ik} – długość granic [m] w krajobrazie pomiędzy płatami należącymi do danych klas i i k

m – liczba klas w krajobrazie

E – całkowita długość granic [m] w krajobrazie

p_{ij} – obwód [m] płatu ij

h_{ij} – odległość od płatu ij do najbliższego płatu tego samego typu, oparta na odległości od granicy do granicy

m – liczba rodzajów klas obecnych w krajobrazie

Po wykonaniu klasyfikacji obrazów satelitarnych wybrano wynikowe, poklasyfikacyjne mapy drzewostanów, które poddano analizie za pomocą wskaźników opisujących strukturę z ekologicznego punktu widzenia. Wskaźniki policzono dla map, które uzyskały największą dokładność klasyfikacji, czyli przedstawiających strukturę gatunkową na podstawie kanałów TM3 TM4 TM5 (ryc. 7, 13, 19). Pod uwagę wzięto także obszary pozbawione roślinności drzewiastej, znajdujące się w obrębie badanych kompleksów leśnych, ponieważ stanowią one integralną część krajobrazu i wpływają na jego zróżnicowanie. Wyniki zostały ujęte w tabelach 5–7.

W badanych kompleksach wskaźnik opisujący powierzchnię poszczególnych klas odzwierciedla powierzchnię, jaką dane gatunki zajmują w terenie, choć widoczne są różnice, co wynika z błędów w samej klasyfikacji. Powierzchnia CA zajmowana przez sosnę w Lesie Kabackim wynosi 447,57 ha (427,70 ha według opisu taksacyjnego), zwiększone wartości uzyskano także w przypadku dębu – 302,85 ha (220,80 ha) oraz olszy – 75,69 ha (46,94 ha), natomiast wykazano mniejszy obszar porastany przez brzozę – 60,30 ha (100,00 ha). W Rezerwacie Sieraków sosna została niedoszacowana – 446,4 ha (483,42 ha), natomiast powierzchnia zajmowana przez pozostałe gatunki uległa znacznemu zwiększeniu, co wyraźnie widać na przykładzie brzozy. Powierzchnia wyliczona w programie Fragstats na podstawie wielkości płatów reprezentujących daną klasę wynosi 290,7 ha, podczas gdy według danych źródłowych jest to zaledwie 79,36 ha. Tak znaczna różnica wynika z faktu, że obszary zajmowane przez inne gatunki liściaste zostały błędnie przypisane do

klasy „brzoza”. Również do tej klasy zostały przyłączone nieliczne piksele odpowiadające gatunkom, które nie zostały uwzględnione w klasyfikacji (grab, osika) oraz obszarowi podmokłemu, który na obrazie satelitarnym nie różnił się od pokrywy leśnej. Te same przyczyny wpłynęły na przeszacowanie powierzchni zajmowanej przez dąb i olszę. Na obrazie przedstawiającym Uroczysko Chojnów obecne były chmury, co także wpłynęło na wyniki klasyfikacji. W Uroczysku Chojnów występują również liczne płaty będące zrębami bądź gniazdami, co świadczy o pracach nad przebudową składu gatunkowego drzewostanów, szczególnie monokultur sosnowych. Jednak zauważalna jest tendencja, podobnie jak w Lesie Kabackim, że sosna zdecydowanie dominuje i przeszacowania są obserwowane na korzyść sosny.

Liczba płatów NP tworząca dany krajobraz i poszczególne kategorie, które wchodzi w jego skład, mówi pośrednio o zróżnicowaniu obszaru. Zgodnie z założeniem najbardziej heterogenicznym terenem powinien być Rezerwat Sieraków, będący częścią Parku Narodowego. Jednak ze względu na występowanie w Uroczysku Chojnów wspomnianych luk w roślinności drzewiastej, to fragment Parku Krajobrazowego składa się z największej liczby płatów (2907). Las Kabacki także zbudowany jest z większej liczby jednostek (743) niż Rezerwat Sieraków (557).

Wskaźnik największej jednostki (LPI) opisujący rozczłonkowanie krajobrazu i jednocześnie jego heterogeniczność przyjmował zróżnicowane wartości. W Lesie Kabackim największy fragment terenu zajmuje płat sosny (10,07%), zaznacza się także dąb (5,55%). Natomiast brzoza (0,45%) oraz olsza (0,54%) występują na obszarze rezerwatu w postaci płatów o zdecydowanie mniejszej powierzchni w stosunku do klasy dębu i sosny. Mała wartość wskaźnika mówi także o tym, że brzoza oraz olsza występują w wielu miejscach (odpowiednio 217 i 245 płatów), ale na nieznacznej powierzchni. W Uroczysku Chojnów największą powierzchnię zajmuje płat reprezentujący sosnę (5,94%). Pozostałe wartości są niskie (poniżej 1%), jedynie dąb osiągnął wartość 1,20%. Sosna będąca dominującym gatunkiem na badanym obszarze jest opisana przez małą wartość LPI , co wskazuje, że klasę buduje szereg płatów o porównywalnej powierzchni (168

Tabela 5. Wskaźniki opisujące strukturę w Rezerwacie Sieraków: a) na poziomie wydzielonych klas; b) na poziomie krajobrazu.

Table 5. Structure of the Sieraków Nature Reserve based on indices from landscape ecology a) class level; b) landscape level.

a)								
Nazwa klasy Class name	CA [ha]	NP <1; + ∞)	PD [liczba/ha]	LPI [%]	LSI <1; + ∞)	PAFRAC (1; 2)	MNN [m]	IJI (0; 100>
dąb oak	58,77	129	4,72	0,25	3,12	1,51	107,56	69,34
sosna pine	446,94	58	2,12	11,14	3,89	1,39	100,92	36,99
brzoza birch	290,70	182	6,66	6,80	8,98	1,63	79,93	52,71
olsza alder	502,83	188	6,88	12,11	10,58	1,60	70,92	73,23
b)								
TA [ha]	NP <1; + ∞)	PD [liczba/ha]	LPI [%]	LSI <1; + ∞)	PAFRAC (1; 2)	IJI (0; 100>	PR <1; + ∞)	SHDI <0; + ∞)
2731,68	557	20,39	12,11	12,19	1,55	97,28	4	1,21

Tabela 6. Wskaźniki opisujące strukturę w Uroczysku Chojnów: a) na poziomie wydzielonych klas; b) na poziomie krajobrazu.

Table 6. Structure of the Chojnów Range based on indices from landscape ecology a) class level; b) landscape level.

a)								
Nazwa klasy Class name	CA [ha]	NP <1; + ∞)	PD [licz- ba/ha]	LPI [%]	LSI <1; + ∞)	PAFRAC (1; 2)	MNN [m]	IJI (0; 100>
obszary nie zalesione <i>non forested area</i>	869,4	168	2,62	5,94	7,67	1,44	111,44	91,81
łąka <i>meadow</i>	162,18	486	7,58	0,52	4,45	1,48	87,85	95,61
olsza <i>alder</i>	263,70	837	13,05	0,88	7,78	1,63	74,42	77,04
brzoza <i>birch</i>	389,91	571	8,90	0,50	9,22	1,63	70,41	75,03
dąb <i>oak</i>	260,37	418	6,52	1,21	5,68	1,58	90,16	66,12
sosna <i>pine</i>	61,02	172	2,68	0,31	1,99	1,35	80,47	79,70
b)								
TA [ha]	NP <1; + ∞)	PD [licz- ba/ha]	LPI [%]	LSI <1; + ∞)	PAFRAC (1; 2)	IJI (0; 100>	PR <1; + ∞)	SHDI <0; + ∞)
6415,20	2907	45,31	5,94	17,47	1,55	82,77	7	1,64

płatów). Liczba płatów olszy (837) i brzozy (571) w odniesieniu do wskaźnika *LPI* informuje o tym, że klasy są rozczłonkowane. Obszar Uroczyska Chojnów tworzy szeregi płatów drzew liściastych, spośród których żaden nie odgrywa znaczącej roli.

W Rezerwacie Sieraków nie wyróżnia się zdecydowanie żadna z klas. Największe wartości *LPI* uzyskały olsza (12,12%) oraz sosna (11,14%), najmniejsze zaś dąb (0,25%). Nieznaczne różnice wartości wskaźnika pomiędzy gatunkami, które dominują w drzewostanach rezerwatu, informują, że każdy z gatunków zajmuje powierzchnię o podobnej wielkości, jednocześnie klasę reprezentuje odmienna liczba płatów – 188 (olsza), 58 (sosna), czyli sosna występuje w dużych zwartych skupiskach.

Wskaźnik *LPI* pokazał, że w analizowanych obszarach nie ma dominującego płatu, powierzchnia największego jednorodnego wydzielenia nie przekracza 15% powierzchni terenu, co wskazuje na jego urozmaicenie.

LPI w odniesieniu do każdego analizowanego obszaru jako krajobrazu leśnego wynosi w przypadku Uroczyska Chojnów 17,47%, Rezerwatu Sieraków – 12,11% i Lasu Kabackiego – 10,06%. Największy jednorodny płat w każdym z kompleksów leśnych stanowi niewielki procent po-

wierzchni, jednak wartości *LPI* mają inne znaczenie ze względu na odmienne powierzchnie badanych obszarów.

Zagęszczenie jednostek jednego typu na powierzchni 100 ha (*PD*) dostarcza informacji o fragmentacji krajobrazu. Odniesienie do określonej powierzchni umożliwia w pewnym stopniu porównanie analizowanych terenów.

Na obszarze Lasu Kabackiego największą wartość uzyskano dla olszy (12,27), ten sam gatunek w Uroczysku Chojnów jest rozmieszczony w podobny sposób (13,05), natomiast w Rezerwacie Sieraków otrzymano wartość niższą (6,88). W podobny sposób wyraża się liczba płatów brzozy występujących na 100 ha (odpowiednio 10,87; 8,90 i 6,66) oraz dębu (7,26; 6,51 i 4,72) i sosny (4,40; 2,62 i 2,12). Niskie wartości wskaźnika informują o niewielkim rozczłonkowaniu krajobrazu, przy czym najmniej rozczłonkowanym gatunkiem jest sosna, która ma znaczący udział w drzewostanach badanych obszarów, a najbardziej – olsza. Gatunki liściaste częściej występują w rozproszeniu. Obiektem najmniej rozczłonkowanym jest Rezerwat Sieraków, co może świadczyć o tym, że został on ukształtowany i na jego obszarze nie zachodzą zmiany takie jak w przypadku Uroczyska Chojnów, gdzie znacząca się gospodarka człowieka.

Tabela 7. Wskaźniki opisujące strukturę w Lesie Kabackim: a) na poziomie wydzielonych klas; b) na poziomie krajobrazu.

Table 7. Structure of the Kabaty Forest based on indices from landscape ecology a) class level; b) landscape level.

a)								
Nazwa klasy Class name	CA [ha]	NP <1; + ∞)	PD [licz- ba/ha]	LPI [%]	LSI <1; + ∞)	PAFRAC (1; 2)	MNN [m]	IJI (0; 100>
obszary niezalesione <i>non forested area</i>	18,63	68	3,41	0,23	1,63	1,31	147,53	54,58
dąb <i>oak</i>	302,85	145	7,26	5,55	9,21	1,59	70,32	85,01
sosna <i>pine</i>	447,57	68	3,41	10,06	5,94	1,41	78,48	58,27
brzoza <i>borch</i>	60,03	217	10,87	0,45	4,10	1,63	84,03	74,69
olsza <i>alder</i>	75,69	245	12,27	0,54	5,02	1,67	81,57	63,55
b)								
TA [ha]	NP <1; + ∞)	PD [licz- ba/ha]	LPI [%]	LSI <1; + ∞)	PAFRAC (1; 2)	IJI (0; 100>	PR <1; + ∞)	SHDI <0; + ∞)
1996,65	743	37,21	10,06	11,45	1,55	74,72	5	1,18

Średnia odległość do najbliższego sąsiada tego samego typu *MNN* opisuje rozkład jednostek w krajobrazie. Wielkości wskaźnika w analizowanych kompleksach oscylują wokół zbliżonych wartości (70 m – 110 m), jedynie w Lesie Kabackim indeks wynosi 147,53 m dla obszarów niezalesionych. Także w Uroczysku Chojnów najwyższa wartość wskaźnika dotyczy tej klasy – 111,44 m, co oznacza, że jednostki należące do danego typu są rozmieszczone w stosunkowo dużych odległościach od siebie w całym kompleksie leśnym. Najniższa wartość *MNN* w Lesie Kabackim została wyliczona dla dębu, który występuje w postaci równomiernie rozmieszczonych płatów. Sosna jako gatunek dominujący przyjmuje wartość 78,48 m, co wynika z wielkości zajmowanej przez nią powierzchni i rozmiarów płatów. Nieco wyższa wartość charakteryzuje olszę (81,57 m) i brzozę (84,03 m), których udział w składzie gatunkowym Lasu Kabackiego jest nieznaczny i występują one w dużych skupiskach małych płatów skoncentrowanych na stosunkowo niedużej przestrzeni. W Uroczysku Chojnów najniższą wartość wskaźnika ma brzoza (70,41 m), co wskazuje, że występuje na badanym obszarze dość często, podobnie olsza (74,42 m). Dąb (90,16 m) występuje w rozproszeniu i w postaci zwartych płatów. Natomiast sosna jako podstawowy gatunek w ChPK zajmuje duże zwarte powierzchnie, a na wartość *MNN* wpływają płaty o stosunkowo niedużej powierzchni znajdujące się w części kompleksu zajętej w większości przez drzewa liściaste. W Rezerwacie Sieraków *MNN* osiąga wartości 107,56 m dla dębu i 100,92 m dla sosny. Sosna występująca na znacznej powierzchni obszaru tworzy zwarte, duże płaty, natomiast dąb zajmuje niewielkie powierzchnie rozrzucone w rezerwacie. Brzoza (79,93 m) i olsza (70,92 m) porastają centralną część terenu.

Układ krajobrazu jest charakteryzowany m.in. przez kształt jednostek, które go tworzą. Kształt jednostek oraz całego krajobrazu opisują wskaźniki kształtu (*LSI*) oraz wymiar fraktalny (*PAFRAC*).

Najprościej opisać kształt jednostki porównując ją do kształtu idealnego, w przypadku rastra jest to kwadrat. Najbardziej urozmaicony kształt ma Uroczysko Chojnów. Jest to wynikiem zastosowania maski i poddania analizie jedynie obszarów leśnych. *LSI* w tym przypadku wynosi 17,47, natomiast wskaźnik osiąga niższe wartości w odniesieniu do Rezerwatu Sieraków – 12,19 i Lasu Kabackiego – 11,45. Niska w stosunku do pozostałych obiektów wartość *LSI* opisująca kształt Rezerwatu Sieraków wynika z kształtu jego granic wytyczonych sztucznie przez człowieka, co jest skutkiem ich uproszczenia.

Na poziomie klas wskaźnik kształtu ma niższe wartości, co świadczy o tym, że analizowane obszary budują jednostki o bardziej zwartych kształtach. W Lesie Kabackim najbardziej nieregularne płaty tworzy dąb (9,21), natomiast polany śródleśne reprezentują kształty zbliżone do kwadratu. Pozostałe klasy charakteryzują wartości pośrednie. W Uroczysku Chojnów *LSI* równe 9,23 osiągnęły płaty brzozy, natomiast sosna występuje w postaci powierzchni o kształtach nieznacznie odbiegających od kwadratu (1,99), co wskazuje na znaczący udział człowieka

w tworzeniu tego krajobrazu. W Rezerwacie Sieraków *LSI* przyjmuje najwyższą wartość dla olszy (10,58).

Kolejnym indeksem opisującym kształt jest wymiar fraktalny, który odnosi się do obwodu i powierzchni badanej jednostki. Wartości *PAFRAC* mieszczą się pomiędzy 1, gdy granica płatu lub krajobrazu jest prosta, a 2, gdy granica jest skomplikowana. Zgodnie z wartościami *PAFRAC* wszystkie analizowane obszary mają długie granice w stosunku do zajmowanej przez nie powierzchni (około 1,55). W przypadku poszczególnych klas w analizowanych obiektach zaznacza się istotne zróżnicowanie, przy czym najbardziej rozbudowany obwód mają płaty brzozy (1,63) i olszy (Las Kabacki – 1,67; Uroczysko Chojnów – 1,63; Rezerwat Sieraków – 1,60). Najmniej rozbudowane granice mają płaty sosny (około 1,40).

Indeks *IJI* opisuje ułożenie względem siebie płatów różnego typu. Jeśli dany typ graniczy z dużą liczbą jednostek różnego rodzaju, wartości wskaźnika wzrastają. W Lesie Kabackim dąb ma największą liczbę sąsiadów różnego typu (85,02), natomiast sosna najmniejszą (58,27), co koresponduje z najmniejszą liczbą płatów (58) o stosunkowo dużej powierzchni. W przypadku Uroczyska Chojnów sosna sąsiaduje z dużą liczbą zróżnicowanych jednostek (79,70), pozostałe klasy także osiągają wysokie wartości w przedziale 66,12 (dąb) – 77,04 (olsza). W Rezerwacie Sieraków zaznacza się większe zróżnicowanie omawianego indeksu. Sosna (36,99) przyjmuje najniższą wartość, co wynika z faktu, że występuje w postaci niewielkiej liczby płatów o stosunkowo dużej powierzchni, a ponadto jest skupiona w pobliżu granicy rezerwatu. Najwięcej sąsiadów rozmieszczonych wzdłuż swoich granic posiada olsza (73,23), która wypełnia wnętrze rezerwatu.

Wszystkie wskaźniki pośrednio opisują bogactwo i zróżnicowanie krajobrazu, ale podstawową miarą wskazującą na różnorodność jest entropia (*SHDI*). Wartość wskaźnika jest związana z liczbą wydzielonych typów jednostek (tab. 6b, 7b, 8b). Największa liczba klas została wydzielona w Uroczysku Chojnów (7) i dla tego obszaru entropia wynosi 1,64, podczas gdy w pozostałych przypadkach – około 1,2. Na zwiększenie różnorodności znaczący wpływ mają także zabiegi człowieka, co widoczne jest na przykładzie Uroczyska Chojnów, gdzie występuje wiele płatów, będących efektem zabiegów zmierzających do przebudowy drzewostanów. Zgodnie z założeniami najbardziej różnorodnym obszarem powinien być Rezerwat Sieraków, jednak ze względu na brak zróżnicowania w odbiciu spektralnym nie wyróżniono terenów zabagnionych, co przyczyniło się do wydzielenia mniejszej liczby klas, a co za tym idzie uzyskania niższych wartości wskaźników charakteryzujących zróżnicowanie.

Wnioski

Wyniki klasyfikacji wskazują, że jej dokładność jest zbyt niska, aby ta technika inwentaryzacji lasu mogła być wykorzystywana w warunkach leśnictwa polskiego. Dokładność klasyfikacji jest także niezadowolająca dla potrzeb gospodarowania na obszarach chronionych.

W prezentowanej pracy analizie zostały poddane obrazy satelitarne Landsat ETM+ o wielkości piksela 30 m. Uśredniona informacja zapisana w pikselu umożliwia odzyskanie cech drzewostanów w sposób przybliżony. Dane pozyskiwane przez satelitę Landsat ETM+ i przetworzone cyfrowo są w związku z tym dobrym źródłem danych do badania kompleksów leśnych w skali regionu, co daje możliwość uzyskania ogólnej charakterystyki lasów na danym terenie. W przypadku zwiększenia skali badań i zwrócenia uwagi na jeden kompleks leśny i jego strukturę przestrzenną odzwierciedlaną przez rozmieszczenie drzewostanów o określonym składzie gatunkowym i wieku, zastosowanie w analizie klasyfikacji nadzorowanej jako jedynego narzędzia badania także pozwala na uchwycenie ogólnych cech struktury lasu.

Otrzymana dokładność klasyfikacji rzędu 70% przy określaniu składu gatunkowego na obrazach satelitarnych informuje, że analiza struktury gatunkowej może być przeprowadzana na podstawie danych satelitarnych. W przypadku, gdy wzrasta udział drzew liściastych, klasyfikacja nadzorowana jest niewystarczająca i wymaga wsparcia np. w postaci analizy wizualnej, bądź zastosowania masek dla klas opisujących wydzielane gatunki. Niezadowolające są rezultaty uzyskane podczas badania przedziałów klas wieku. Zwiększenie szczegółowości generuje dodatkowe błędy, więc informacje zebrane przez satelitę Landsat ETM+ nie są wystarczająco dobre do badania struktury wiekowej zróżnicowanych kompleksów leśnych. Poprawienie wyników przy wydzieleniu klas wieku mogłoby zostać uzyskane poprzez zastosowanie danych satelitarnych o większej rozdzielczości przestrzennej (np. Ikonos) dostosowanej do zróżnicowania badanego obszaru, jak również korzystanie z baz danych tworzonego obecnie Systemu Informatycznego Lasów Państwowych jako źródła informacji umożliwiającego wyszukanie stosownych powierzchni referencyjnych.

Analizowane kompleksy leśne są położone w jednym regionie biogeograficznym, jednak odmienny charakter każdego z nich nie pozwolił na stworzenie jednolitych klas i konieczne okazało się stworzenie oddzielnych sygnatur spektralnych. Wskazuje to, że nawet na niewielkim obszarze warunki siedliskowe są czynnikiem zmiennym odgrywającym rolę w kształtowaniu odpowiedzi spektralnej badanych drzewostanów.

Dzięki wskaźnikom opisującym krajobraz i jego składowe w sposób ilościowy, można wyciągać wnioski na temat struktury przestrzennej kompleksów leśnych w oparciu o skład gatunkowy. Indeksy informują o układzie jednostek w przestrzeni i wzajemnych relacjach między nimi. Stanowią ilościowe uzupełnienie wyników klasyfikacji. Struktura lasu opisana za pomocą indeksów dostępnych w programie Fragstats oddaje charakter kompleksów zawarty w opisach taksacyjnych. Jednak wykorzystanie do analizy jedynie danych ilościowych uzyskanych w ten sposób jest niewystarczające. Wartości wskaźników należy rozpatrywać w powiązaniu z danymi teledetekcyjnymi wykorzystanymi do badań oraz uwzględnić informacje zebrane przez służby leśne. Wskaźniki charakteryzujące

kształt odpowiadają danym wejściowym (sklasyfikowane obrazy), jednak odbiegają od uogólnionej treści map drzewostanowych, co jest związane z wielkością piksela. Podobnie jest z indeksami opisującymi powierzchnię i liczbę typów jednostek występujących na danym terenie. Miary przedstawiające zróżnicowanie (*PD*, *SHDI*) i sąsiedztwo (*IJI*, *MNN*) dodają do podstawowych danych o strukturze krajobrazu informacje nowe jakościowo. Cenne może okazać się porównanie wskaźników policzonych dla różnych okresów, dające obraz kierunków zachodzących w krajobrazie zmian.

Wartości indeksów liczone na podstawie danych teledetekcyjnych są zależne od wielkości piksela, więc rozdzielczość danych źródłowych powinna być odpowiednio dobrana ze względu na cel opracowania, zwłaszcza w kwestii kształtu i zróżnicowania, które są w znacznym stopniu zależne od szczegółowości danych, które determinują ilość jednostek możliwych do wydzielenia i dalszej analizy.

Sukcesywne wprowadzanie nowych systemów satelitarnych i zamiar monitorowania obszarów leśnych w programie GMES (Global Monitoring for Environment and Security) (Lisenbarth, 2005) sugeruje, aby nawet obarczone błędami wyniki klasyfikacji wykorzystywać w analizie zmian struktury wewnętrznej obszarów leśnych. Powyższa propozycja związana jest z ekologiczno-krajobrazowym podejściem do ocen wewnętrznego zróżnicowania obiektów przyrodniczych (Mozgawa, 1991).

Powyższa propozycja wykorzystywałaby rezultaty klasyfikacji komputerowej średniorozdzielczych obrazów satelitarnych jako wejścia do tworzenia zbiorów wskaźników opisujących strukturę krajobrazu.

Spis literatury

- Beaubien J., 1979: *Forest Type Mapping from Landsat Digital Data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 45, nr 8.
- Bochenek Z., Ciołkosz A., Iracka M., 1997: *Zmiany stanu lasów w Sudetach Zachodnich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, t. 44, z. 95.
- Bychawski W., Lisenbarth 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.
- 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.
- Ciołkosz A., Poławski Z., 1980, *Mapa użytkowania ziemi w skali 1:250 000 sporządzona za pomocą wizualnej klasyfikacji treści obrazów satelitarnych*, [w:] *Zastosowanie teledetekcji w badaniach środowiska geograficznego*. PWN, Warszawa.
- Congalton R.G., 1991, *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data*, Remote Sensing of Environment, vol. 37, 35–46.
- Czerwiński Z., Czepińska-Kamińska D., Zielony R., 2003, *Środowisko przyrodnicze Lasu Kabackiego*, Wyd. SGGW.
- Domański J. (red.), 1998, *ERDAS Field guide: przewodnik geoinformatyczny*, GEOSYSTEMS Polska, Warszawa.

- Instrukcja urządzania lasu. Część I. Instrukcja sporządzania planu urządzania lasu dla nadleśnictwa*, 2003, Państwowe Gospodarstwo Leśne. Lasy Państwowe, Warszawa.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D.J., 2002, *Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies*, BioScience, vol. 52, 19-30.
- Lisenbarth A., 2005, *Diamentowy GMES*, Geodeta, nr 1(116).
- Łaszek Cz., Sendzielska B., 1992, *Wartości przyrodnicze województwa warszawskiego*, Centrum Promocji Turystycznej Województwa Warszawskiego, Warszawa.
- Łaszek Cz., Ronikier-Dolańska, A., 1996, *Chojnowski Park Krajobrazowy – mieszkamy w parku krajobrazowym*, Fundacja nRP-K, NiLP „Terra Sana” i Zarząd Mazowieckiego i Chojnowskiego PK, Otwock.
- McGarigal K., Marks B., 1995, *Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-351.
- Mozgawa J., 1991, *Problemy fotointerpretacji i teledetekcji lasów w krajobrazie ekologicznym*, Przegląd Geodezyjny, 3, 10–12.
- Mozgawa J., Kadlewicz T., Kosiński K., Grudziński T., Botul K., 1994, *Odwzorowanie biogeocenozy Białowieckiego Parku Narodowego na zdjęciach satelitarnych TM*, Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji, t. 24, PTG, KTS, Warszawa, 90-99.
- Mozgawa J., Piekarski E., Będkowski K., 2000, *Fotogrametria i teledetekcja w leśnictwie polskim*, [w:] *Stan i perspektywy badań z zakresu urządzania lasu i ekonomiki leśnictwa*, Materiały IV Konferencji leśnej, Sękocin Las, 13–14 VI, 2000, IBL, Warszawa.
- Mozgawa J., Chromański A., Zawila-Niedźwiecki T., 2001, *Potencjalne i praktyczne możliwości wykorzystania teledetekcji w Lasach Państwowych*, Materiały I Krajowej Konferencji „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych”, Rogów, 3-5 XII, 2001, <http://www.lasypanstwowe.gov.pl/sip/Aktualia/Konfrogram/PDF-y/HARMONOGRAM.pdf>
- Piekarski E., Olenderek H., Korpetta D., 1993, *Fotogrametria i systemy informacji przestrzennej w urządzaniu lasu w warunkach polskich*, Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa. Seria B, nr 15.
- Plan ochrony Kampinoskiego Parku Narodowego na lata 1991–2001, 1992 Operat ochrony ekosystemów leśnych*. BULiGL o/Warszawa, Warszawa.
- Piekarski E., 1998, *Wykorzystanie zdjęć lotniczych w taksacji leśnej*, Sylwan, nr 6, 81–83.
- Plan urządzania lasu częściowego leśnego rezerwatu krajobrazowego „Las Kabacki” im. Stefana Starzyńskiego na okres 1987–2001, 1987, SGGW, Warszawa.*
- Plan urządzania lasu dla Nadleśnictwa Chojnów*, Tom A. BULiGL o/Warszawa, 1999, Warszawa.
- Wiśniewska E., Zawila-Niedźwiecki T., 1998, *Klasyfikacja treści leśnej zdjęć satelitarnych*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, t. 45, z. 97, 157–167.
- Richling A., Solon J., 1992, *Kompleksowa geografia fizyczna*, PWN, Warszawa.
- Wiśniewska E., 2000, *Wykorzystanie zdjęć satelitarnych do charakteryzowania drzewostanów sosnowych*, rozprawa doktorska, maszynopis, Wydział Leśny SGGW.
- Wrzesień M., 2003, *Metody badania struktury lasów okolic Warszawy na podstawie zdjęć satelitarnych i lotniczych*, praca magisterska, Zakład Teledetekcji Środowiska WGiSR UW, Warszawa.
- Zawila-Niedźwiecki T., 1990, *Wybrane zagadnienia wykorzystania zdjęć wykonanych przez satelity Landsat TM i SPOT w badaniach lasu*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, t. 37, z. 1–2.
- Zawila-Niedźwiecki T., Bochenek Z., Strzelecki P., 1994, *Wykorzystanie zdjęć satelitarnych ERS-1 w inwentaryzacji szkód leśnych*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, t. 41, z. 89, 81–95.
- Zawila-Niedźwiecki T., 1995, *Radary w teledetekcji lasu*, Sylwan, nr 2, 31–40.



Magdalena Wrzesień ukończyła studia na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych, w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Obecnie jest słuchaczką drugiego roku Studium Doktoranckiego WGiSR w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Zajmuje się analizą zdjęć hiperspektralnych i ich zastosowaniem w badaniach środowisk wysokogórskich. Zakład Teledetekcji Środowiska, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa, tel. (22) 55 21 507, e-mail: septy@uw.edu.pl