

WOJCIECH BYCHAWSKI
MARIA IRACKA
JERZY MOZGAWA

528.77.029.673:634.0

Wykorzystanie lotniczych zdjęć spektrostrefowych do badań uszkodzeń drzewostanów sosnowych

Lasy zajmują w Polsce około 85,5 tys. km², a więc ponad 27% powierzchni kraju. Przeważającą część, bo blisko 85% zalesionej powierzchni, zajmują lasy iglaste, zwłaszcza bory sosnowe. Przewaga borów sosnowych jest wynikiem rolniczego niegdyś charakteru polskiej gospodarki. Lasy rosnące na dobrych glebach były niszczone, a ich miejsce zajmowały uprawy rolne. Pozostawały natomiast lasy na najuboższych siedliskach, w większości bory. Gospodarka leśna, zdeterminowana istniejącym stanem rzeczy oraz dążeniem do osiągnięcia maksymalnego zysku bez względu na społeczną wartość lasu, przekształcała bogate zespoły leśne w lite bory sosnowe sprzyjające masowemu pojawom szkodników oraz podatne na liczne zewnętrzne czynniki degradujące środowisko leśne.

Rozpoczęty po drugiej wojnie światowej nowy, dynamiczny rozwój przemysłu w Polsce stworzył nowy, bardziej znaczący problem, polegający na obniżaniu produktywności lasu i ograniczaniu jego funkcji rekreacyjnych.

Mimo poważnych nakładów na ochronę powietrza przed zanieczyszczeniem zakłady przemysłowe w Polsce wydalily do atmosfery w 1975 roku ponad 5,2 miliona ton pyłów i gazów, w tym 2 miliony ton szczególnie szkodliwego dla roślin dwutlenku siarki. W 1965 roku pod działaniem emisji przemysłowych znajdowało się około 250 tysięcy hektarów lasu, z czego 20% stanowiły drzewostany śmiertelnie porażone. W 1975 roku powierzchnia ta wzrosła blisko dwukrotnie. Według oficjalnych danych 5% zalesionej powierzchni (433 tys. ha) znajduje się na terenach, gdzie roczny opad pyłów emitowanych przez zakłady przemysłowe przekracza liczbę 2,5 ton na hektar lasu, a 8% (649 tys. ha) na terenach o opadach pyłu w granicach od 1 do 2,5 ton na hektar lasu rocznie. W bliskości wielkich zakładów przemysłowych zanieczyszczenie powietrza jest wielokrotnie większe. Ocenia się, że w 1985 roku w zasięgu działania przemysłowych zanieczyszczeń powietrza będzie się znajdowało około miliona hektarów lasu, czyli ponad 12% powierzchni zalesionej.

Emitowane do atmosfery związki w postaci pyłów i gazów atakują rośliny w różny sposób. Pył zawieszony w atmosferze ogranicza wymianę gazową w aparacie asymilacyjnym roślin, a osadzając się na liściach hamuje proces fotosyntezy. Ponadto pył osiadając na powierzchni gleby powoduje zmianę jej odczynu i w zależności od swego składu chemicznego może wprowadzać do gleby związki fitotoksyczne. Znacznie bardziej groźne jest działanie gazowych zanieczyszczeń powietrza, które bezpośrednio atakują liście i pędy powodując zmiany w tkankach, a w końcu śmierć aparatu asymilacyjnego i całego drzewa.

Proces degradacji lasów znajdujących się pod wpływem emisji przemysłowych jest bardzo skomplikowany i do dziś nie jest jeszcze całkowicie poznany. Wśród przyrodników coraz bardziej przeważa pogląd, że mówiąc o przemysłowych uszkodzeniach lasu trzeba mieć na myśli nie tylko bezpośrednie działanie pyłów i gazów na aparat asymilacyjny, lecz zmianę całego zespołu warunków bytowania lasu, tworzących określony system ekologiczny. Równowaga ekologiczna lasów w Polsce jest i tak dość chwiejna. Wynika to z przewagi monolitycznych borów sosnowych, bytujących na ubogich siedliskach, składających się z równowiekowych drzewostanów nader często powstałych w wyniku zalesienia stałych biocenotycznie gruntów porolnych. Nie bez znaczenia jest również wpływ melioracji wodnych, których ubocznym skutkiem jest naruszenie stosunków wodnych w lasach. Ten stan rzeczy sprzyja powstawaniu pożarów leśnych, wiatrołomów oraz masowym pojawom szkodników.

Do najgroźniejszych szkodników leśnych w Polsce należy zaliczyć przede wszystkim szkodniki sosny: strzygonię choinówkę (*Panolis flammea*), poprocha cetyniaka (*Bupalus piniarius*), barczatkę sosnowkę (*Dendrolimus pini*), zwójkę sosnoweczkę (*Evetria buoliana*), osnuję gwiazdzistą (*Acantholyda nemoralis* i *A. erythrocephala*), borecznika sosnowca (*Diprion pini*), korniki (*Blastophagus piniperda* i *B. minor*) i inne. W borach sosnowych groźnymi szkodnikami są również niektóre grzyby, a zwłaszcza osutka sosnowa (*Lophodermium pinastri*), huba korzeniowa (*Trametes radiciperda*) i inne. Najpoważniejszym szkodnikiem wtórnym borów świerkowych jest kornik drukarz (*Ips typographus*). W lasach liściastych i mieszanych, mimo iż właśnie w nich żyje najwięcej gatunków organizmów zwierzęcych, masowe pojawianie się szkodników jest rzadkie.

Gradacje szkodników powodują coraz bardziej poważne szkody gospodarcze. Według Koechlera wartość szkód wyrządzonych tylko w 1965 roku przez czynniki biotyczne określa się kwotą 2 miliardów złotych.

Działalność przemysłu, oprócz ewidentnych szkód dostrzeganych w sąsiedztwie niektórych zakładów, wprowadza w środowisko leśne czynnik nękający, który powoduje nie zawsze wyraźnie widoczne osłabienie drzewostanów. To dodatkowe osłabienie wywołuje łańcuch czynników spraw-

czych, pogarszających stan sanitarny lasu. W większości przypadków nekający charakter zanieczyszczeń przemysłowych, wobec stosunkowo wolno narastającego zjawiska obniżania się wartości lasu, jest trudny do określenia, a co za tym idzie do wyodrębnienia udziału przemysłu w zespole czynników sprawczych chronicznych uszkodzeń drzewostanów. Ta trudność jest często powodem różnicy stanowisk przy ustalaniu wysokości odszkodowań, do których płacenia jest zobowiązany przemysł.

Według danych resortu leśnictwa oprócz drastycznych zmian w drzewostanach sosnowych rosnących w strefie silnych zagrożeń przemysłowych zauważa się również zmiany w największej jeszcze powierzchniowo strefie zagrożeń małych. Obserwuje się tu spadek produktywności siedliska o 0,5 klasy bonitacji i spadek przyrostu masy drzewnej o około 10%. Szkody objawiają się tu początkowo w postaci przebarwionego i przerzedzonego igliwia powodując zmianę gęstości i kształtu korony. Drzewa osłabione w ten sposób są bardziej niż zwykle atakowane przez szkodniki owadzie i grzyby, co powoduje masowe wydzielanie się posuszu, a więc zmniejszenie zamożności drzewostanu. Przerzedzenie lasu zwiększa jego podatność na działanie wiatru, okiści, a także zwiększa wrażliwość drzew na działanie niskich temperatur i zmian wilgotności gleby. W efekcie dochodzi zwykle do konieczności usunięcia przerzedzonych drzewostanów zrębem zupełnym, często przed osiągnięciem wieku rębnego.

Pogarszający się stan sanitarny lasu powoduje, że mimo znacznego wzrostu nakładów inwestycyjnych udział produkcji leśnictwa w tworzeniu dochodu narodowego relatywnie maleje. Szacuje się, że szkody wyrządzone w lasach przez zespół czynników biotycznych i abiotycznych przyniosły tylko w 1972 roku straty rzędu 7 miliardów złotych. Wagę problemu podkreślił fakt, że ta kwota stanowi prawie połowę wartości drewna pozyskanego w Polsce w tym roku, jak też i to, że szacunek nie uwzględnia strat społecznych, wynikających z ograniczenia pozaprodukcyjnych funkcji lasu.

Poprawa istniejącego stanu zależy zarówno od przemysłu, jak i od leśnictwa. Prowadzonymi pracami w zakresie budowy i eksploatacji urządzeń ograniczających szkodliwe oddziaływanie przemysłu towarzyszą prace związane z przebudową drzewostanów w celu wprowadzenia gatunków drzew bardziej odpornych na uszkodzenia.

Warunkiem koniecznym do prowadzenia większości prac w zakresie ochrony lasu, poprawy jego produktywności i wielorakich funkcji pozaprodukcyjnych jest posiadanie informacji o istniejącej sytuacji w lasach oraz o rozmiarach i dynamice zachodzących tam zmian. Takie informacje są w Polsce zbierane w znacznej mierze przez bezpośrednie oględziny drzew uzupełniane wynikami badań laboratoryjnych. Są to sposoby niezmiernie pracochłonne, kosztowne i wobec konieczności ekstrapolowania wyników

badania prowadzonych metodą reprezentacji utrudniają i ograniczają wartość syntezy badanych zjawisk. Ogromną pomocą w zdobywaniu informacji o lesie mogą być właściwie interpretowane zdjęcia lotnicze.

Treść zdjęcia lotniczego lasu tworzą, w głównej mierze, obrazy górnej części koron drzew. Dlatego też zakres stosowania zdjęć lotniczych w leśnictwie jest związany z badaniem takich zjawisk, które się uwidaczniają w morfologii koron oraz w fizjologii aparatu asymilacyjnego tworzącego powierzchnię odbijającą światło.

Problem użyteczności metod fotointerpretacji, w najbardziej ogólnym pojęciu, powinien być rozpatrywany w dwóch aspektach: metodycznym i przyrodniczym. Z metodycznego punktu widzenia zagadnienie sprowadza się do wyboru bądź opracowania skutecznych sposobów notacji i percepcji informacji o terenie, w tym przypadku o lesie oglądanym z góry z pokładu samolotu lub sztucznego satelity Ziemi. W aspekcie przyrodniczym problem ma charakter poznawczy z tym, że postępowanie badawcze ma zmierzać ku znajdowaniu korelacji między cechami lotniczego obrazu lasu określonymi przez metodyków fotointerpretacji a czynnikami sprawczymi zjawisk występujących w lesie.

Powodzenie prac badawczych, ich późniejsza użyteczność w praktyce, zależy nie tylko od postępów i efektów badań metodycznych i badań przyrodniczych, ale przede wszystkim od właściwego ich łączenia.

Metoda fotointerpretacji powinna być traktowana w przyszłości jako narzędzie poznania dane do wykorzystania specjalistom znającym genezę i zmienność zjawisk zarejestrowanych na zdjęciach.

Ze zrozumiałych względów badania metodyczne muszą wyprzedzać badania przyrodnicze. Jest to potrzebne do określania aktualnych, dla posiadanego stanu wiedzy i techniki, możliwości metod fotointerpretacji, będących, po spopularyzowaniu, źródłem inspiracji badań przyrodniczych. Zgodnie z tą zasadą Instytut Geodezji i Kartografii wykorzystując literaturę oraz swoje formalne możliwości wykonywania zdjęć lotniczych rozpoczął w 1972 roku eksperymenty mające na celu zdobycie własnych doświadczeń oraz sprecyzowanie możliwości zastosowania fotointerpretacji w leśnictwie. Sytuacja była o tyle skomplikowana, że wcześniejsze próby wykorzystania w Polsce panchromatycznych czarno-białych zdjęć lotniczych dla potrzeb leśnictwa utknęły w martwym punkcie, zarówno ze względów formalno-organizacyjnych, jak też merytorycznych, spowodowanych przecenianiem wartości informacyjnych takich zdjęć zwłaszcza przy ówczesnie stosowanych sposobach interpretacji. Te okoliczności stworzyły atmosferę rozczarowania i nieufności wśród leśników w stosunku do możliwości i celowości stosowania fotointerpretacji. Nieufność była pogłębiona również mało udanymi próbami wykorzystania w leśnictwie metod fotogrametrycznych. Wiadomo było, że przełamanie uzasadnionej pod wie-

loma względami rezerwy środowiska leśników oraz podniesienie użyteczności i zakresu stosowania zdjęć lotniczych wymaga innego spojrzenia na kwestię fotointerpretacji w leśnictwie. Zdecydowano więc zaniechać na razie doskonalenia użyteczności zdjęć panchromatycznych i ponownego forsowania ich wykorzystywania w leśnictwie na rzecz popularyzowania nowych technik fotointerpretacyjnych.

Z wielu znanych wówczas z literatury technik wybrano taką, która wykorzystuje fotografię lotniczą lasu wykonaną na filmie spektrostrefowym. Wybór tej właśnie techniki był podyktowany zachęcającymi doniesieniami o jej zaletach przy wykrywaniu uszkodzeń roślinności oraz stosunkowo małymi nakładami środków potrzebnych do przeprowadzenia eksperymentu.

Pierwsze próby zostały wykonane na filmie Kodak Ektachrome IR, ale właściwe eksperymenty rozpoczęto w 1974 roku, po otrzymaniu specjalnie przystosowanego do fotografii lotniczej filmu Kodak Aerochrome IR 2443.

Film Kodak Aerochrome Infrared 2443 jest barwnym, trójwarstwowym filmem diapozytywowym. Warstwa dolna, leżąca bezpośrednio na podłożu z masy plastycznej, jest uczulona na promienie czerwone i zabarwiana na purpurowo. Warstwa środkowa jest uczulona na zieleń z wprowadzonym barwnikiem żółtym, natomiast warstwa zewnętrzna, uczulona na bliską podczerwień, jest zabarwiana na niebieskozielono. Każda z warstw jest ponadto uczulona na promieniowanie niebieskie, które jest jednak zatrzymywane filtrem żółtym w chwili fotografowania.

Natężenie barwy określonej warstwy emulsji po wywołaniu odwracalnym jest odwrotnie proporcjonalne do natężenia padającego na film promieniowania elektromagnetycznego o charakterystyce zgodnej z sensybilizacją tej warstwy.

Fotografując przez żółty filtr obiekt odbijający wyłącznie promieniowanie czerwone naświetlimy tylko warstwę dolną, natomiast w dwóch pozostałych nie zajdzie żadna reakcja. Po wywołaniu warstwa naświetlona zostanie zatem przezroczysta, a zabarwią się: środkowa na żółto, a górna na niebieskozielono. W ten sam sposób wyjaśnia się powstawanie na filmie spektrostrefowym obrazów przedmiotów odbijających tylko promieniowanie zielone lub tylko podczerwone, tj. takie, na jakie są uczulone poszczególne warstwy emulsji filmu. Tak więc obiekt odbijający tylko promieniowanie w zakresie zieleni będzie tworzył obraz w barwie warstw nie naświetlonych, czyli purpurowej i niebieskozielonej, a odbijane tylko promienie podczerwone stworzą po wywołaniu obraz w barwach purpurowej i żółtej.

Dobór barw nie naświetlonych i wywołanych warstw emulsji filmu Aerochrome IR 2443 nie jest przypadkowy. Powstające tam barwy purpurowa, żółta i niebieskozielona są barwami szczególnymi. Każdą z nich moż-

na bowiem uzyskać odejmując od światła białego jedną z barw podstawowych, na które są selektywnie wrażliwe barwoczułe receptory oka ludzkiego (tzw. czopki), to jest na barwę zieloną, niebieską i czerwoną.

Opisany sposób powstawania barwnego obrazu na omawianym filmie spektrostrefowym pozwala również uzmysłowić sobie proces powstawania barw podczas oglądania, a więc i interpretacji diapozytywu wykonanego na takim filmie. Wywołany film spektrostrefowy Kodak Aerochrome IR 2443 można traktować jako zestaw nałożonych na siebie w każdym punkcie obrazu filtrów subtraktywnych o różnej gęstości, odwrotnie proporcjonalnej do natężenia promieniowania elektromagnetycznego w przedziale określonym zakresem uczulenia poszczególnych warstw emulsji. Taki zestaw może się składać z jednego, dwóch lub trzech filtrów subtraktywnych o różnym natężeniu barwy purpurowej, żółtej lub niebieskozielonej. Jeżeli strumień promieni elektromagnetycznych odbitych od obiektu zawiera w sobie fale, na które są uczulone wszystkie warstwy emulsji, to obraz takiego obiektu na diapozytywie będzie przezroczysty.

Powstawanie wrażenia barw diapozytywu podświetlonego światłem białym można teraz opisać następująco: Przechodzące przez przezroczyste białe światło może być traktowane jako suma światła czerwonego, zielonego i niebieskiego. Jeżeli takie światło padnie na warstwę naświetloną, to ponieważ nie została ona zabarwiona w procesie wywoływania, światło przeniknie przez nią bez zmiany, a więc będzie oglądane jako światło białe. Natomiast, jeżeli białe światło podświetlające diapozytyw padnie na warstwę zabarwioną, tworzącą filtr subtraktywny, wówczas po jej przeniknięciu skład światła ulegnie zmianie zgodnie z zasadą odejmowania barw.

Jak wiadomo, barwa purpurowa (P) może powstać po odjęciu od światła białego (B) barwy zielonej (Z), czyli

$$P = B - Z. \quad (1)$$

Ponieważ światło białe jest sumą barw czerwonej (C), niebieskiej (N) i zielonej (Z), czyli

$$B = C + N + Z,$$

to subtraktywne działanie filtru purpurowego można, po wykorzystaniu wzoru (1), wyrazić równaniem

$$P = N + C. \quad (2)$$

Z równania (2) wynika, że subtraktywny filtr purpurowy pochłaniając barwę zieloną z przenikającego przezeń światła białego zamienia je na światło czerwone i niebieskie.

Rozumując w ten sposób łatwo jest zdać sobie sprawę z funkcjonowania dwóch pozostałych filtrów subtraktywnych w momencie przepuszczania światła białego.

Barwa żółta (\dot{Z}) może powstać po odjęciu od światła białego barwy niebieskiej

$$\dot{Z} = B - N. \quad (3)$$

Uwzględniając w równaniu (3) równanie światła białego otrzymuje się

$$\dot{Z} = C + Z. \quad (4)$$

Równanie (4) oznacza, że subtraktywny filtr żółty zamienia padające nań światło białe na czerwone i zielone zatrzymując niebieskie. Ta właściwość żółtego filtra jest wykorzystywana, o czym wspomniano, także w trakcie fotografowania dla odcięcia promieniowania niebieskiego, na które jest dodatkowo uczulona każda warstwa tego filmu.

Barwa niebieskozielona (NZ) jest wynikiem odjęcia barwy czerwonej od białej

$$NZ = B - C. \quad (5)$$

Wobec tego funkcję subtraktywnego filtra niebieskozielonego określa równanie

$$NZ = N + Z. \quad (6)$$

Widać zatem, że subtraktywny filtr niebieskozielony zatrzymując barwę czerwoną zamienia białe światło na niebieskie i zielone.

W efekcie oglądania diapozytywu filmu Kodak Aerochrome IR 2443 podświetlonego białym światłem, do oka obserwatora docierają trzy podstawowe barwy, na które są uczulone receptory oka, czyli niebieska, zielona i czerwona. Dzięki temu do oka obserwatora są dostarczane informacje potrzebne do funkcjonowania fizjologicznego procesu odbierania wszystkich możliwych barw i ich odcieni. Obrazy obiektów sfotografowanych na filmie spektrostrefowym są wprawdzie przedstawione w barwach nierzeczywistych, lecz umożliwiają wizualną percepcję zjawisk zachodzących również w pozawidzialnym zakresie spektrum (promieniowanie podczerwone).

Liczba warstw emulsji omawianego filmu spektrostrefowego oraz zakresy uczulenia poszczególnych warstw są związane z jego przeznaczeniem. Film ten został swego czasu wyprodukowany dla potrzeb armii amerykańskiej z myślą o stworzeniu możliwości łatwego rozróżniania na zdjęciach lotniczych roślin żywych od ściętych, a więc zamierających lub martwych, używanych do maskowania obiektów wojskowych oraz do odróżniania roślin od ich imitacji. Przy wyborze liczby i zakresów uczulenia warstw emulsji kierowano się zdolnością odbijania promieni elektromagnetycznych o różnej długości fali od powierzchni zielonego liścia. Aczkolwiek liście różnych gatunków drzew mają nieco inną charakterystykę spektralną, to jednak mają one jedną wspólną cechę. Wyraża się ona tym,

że wszystkie krzywe odbicia spektralnego liści mają dwa maksima i jedno minimum. Jedno maksimum występuje w zakresie zieleni, a drugie, znacznie większe, w zakresie podczerwieni. Minimum odbicia przez zielony liść występuje w zakresie promieniowania czerwonego. Tak więc każda z warstw filmu spektrostrefowego jest uczulona na taki zakres promieniowania elektromagnetycznego, który odpowiada ekstremalnym punktom krzywej odbicia spektralnego zielonego liścia. Charakterystyka odbicia spektralnego roślinności jest jedną z przyczyn niepowodzeń prób wykorzystania w leśnictwie czarno-białego filmu panchromatycznego, którego maksimum uczulenia przypada na barwę czerwoną, a więc tę, która jest najmniej odbijana przez zieloną roślinność. Film spektrostrefowy usuwa tę niedogodność właśnie dzięki przystosowaniu sensybilizacji warstw emulsji do charakterystyki spektralnej roślinności liściastej.

Z licznych badań spektrofotometrycznych wynika, że liść poddany stressowi, zmieniając swe właściwości, zmienia charakterystykę spektralną, co jest dostrzegane zwłaszcza w punktach ekstremalnych krzywej odbicia. Obraz drzewa liściastego na zdjęciu lotniczym jest utworzony niemal wyłącznie przez promieniowanie elektromagnetyczne odbite od powierzchni liści. Dlatego też badania uszkodzeń drzew liściastych przy użyciu filmu spektrostrefowego mogą w dużej mierze korzystać z poznanych dość dobrze korelacji między fizjologią i morfologią liścia, a wywołaną tym odmiennością charakterystyk spektralnych. Znane są liczne udane zastosowania filmu spektrostrefowego w leśnictwie, lecz nie dotyczą one zwykle gatunków drzew mających znaczenie gospodarcze w Polsce. Szczególnie mało jest informacji na temat wykorzystywania fotointerpretacji do badania drzewostanów sosnowych, a więc najważniejszych z punktu widzenia polskiej gospodarki leśnej. Ten fakt spowodował, że prace trzeba było zaczynać nieomal od podstaw.

W wyniku dotychczasowych prac Instytut Geodezji i Kartografii zgromadził pokaźną liczbę materiałów ilustracyjnych, których analiza wzbogaca doświadczenie i umożliwia rozszerzenie kręgu osób zainteresowanych, zwłaszcza wśród leśników.

Zgodnie z zasadą wyprzedzania badaniami metodycznymi badań przyrodniczych Instytut Geodezji i Kartografii koncentruje się głównie na pracach w zakresie doboru optymalnych skal, techniki oraz pory wykonywania zdjęć lotniczych drzewostanów sosnowych, znajdujących się pod wpływem biotycznych i abiotycznych czynników stressowych. Równoległe są prowadzone prace badawcze mające na celu opracowanie takich sposobów interpretacji lotniczych zdjęć spektrostrefowych, zdjęć w barwach naturalnych oraz czarno-białych panchromatycznych i w podczerwieni, które umożliwią wydobycie największej liczby informacji o lesie. Zostały również rozpoczęte badania, których celem jest przybliżone korelowanie lot-

nicznych obrazów lasów z charakterem zarejestrowanych na nich zjawisk przyrodniczych. Badania te są na razie prowadzone przez Instytut Geodezji i Kartografii z wykorzystaniem wiedzy specjalistów różnych dziedzin nauk przyrodniczych, zapraszanych do współpracy. Zakres tych badań jest ograniczony, a ich wyniki mają służyć przede wszystkim eksperymentom doskonalącym metody fotointerpretacji. Ponadto, wyniki tych badań, po ich upowszechnieniu, pozwolą, być może, lepiej dostosować program badań przyrodniczych do specyfiki metod fotointerpretacyjnych.

Badania metodyczne są prowadzone z wykorzystaniem zdjęć lotniczych wykonanych w różnych rejonach Polski. Pola doświadczalne Instytutu Geodezji i Kartografii stanowią łącznie powierzchnię ponad 3,5 tys. ha lasów. Na zdjęciach są zarejestrowane obrazy fragmentów drzewostanów sosnowych, będących zarówno pod bezpośrednim długotrwałym działaniem zanieczyszczonego powietrza, jak też drzewostanów potencjalnie zagrożonych przez zakłady przemysłowe. Duża liczba zdjęć obrazuje ponadto drzewostany atakowane tylko przez czynniki biotyczne, a mianowicie drzewostany niszczone żerem poprocha cetaniaka i cetyńców lub też opalone przez hubę korzeniową. Sfotografowano również powierzchnię około 1200 ha, obejmującą drzewostany zagrożone masowym pojawem pierwotnych szkodników sosny w stałych ogniskach gradacyjnych. Większość pól doświadczalnych była fotografowana więcej niż raz w różnych skalach: od 1 : 2500 do 1 : 10 000.

Badania nad zastosowaniem fotointerpretacji do określania uszkodzeń drzewostanów, będących pod wpływem działania zakładów przemysłowych, są prowadzone we współpracy z Instytutem Badawczym Leśnictwa w Warszawie oraz z Biurem Projektów Przemysłu Energetycznego „Energo-pomiar” w Gliwicach. Metodyka badania uszkodzeń drzewostanów wywołanych czynnikami biotycznymi jest opracowywana we współpracy z Okręgowym Zarządem Lasów Państwowych w Białymstoku oraz z Okręgowym Przedsiębiorstwem Geodezyjno-Kartograficznym w Białymstoku.

Stosowane w badaniach zdjęcia lotnicze na filmie spektrostrefowym okazały się w praktyce trudne do interpretacji. Powodem tego jest skomplikowany proces obróbki fotochemicznej oraz mało jeszcze zbadany wpływ wysokości lotu na ogólne zabarwienie diapozytywów. W praktyce oznacza to brak dokładnej powtarzalności barw. Tak więc zdjęcia tego samego fragmentu lasu, wykonane w tych samych warunkach, różnią się ogólnym zabarwieniem, jeśli były wykonywane z różnych wysokości. Zmianę zabarwienia powoduje także niejednoczesność wywoływania zdjęć wykonanych w tych samych warunkach oświetlenia i nalotu. Tym bardziej zdjęcia tej samej powierzchni leśnej, wykonane w różnym czasie, nie zachowują identycznych barw. Nakładają się tu bowiem zmienności zachodzące w procesie wywoływania ze zmiennością pory fenologicznej, warun-

ków oświetlenia, stanu atmosfery itp. Wobec tego nie można klucza fotointerpretacyjnego opierać na dokładnym nazywaniu barw dla określonych zjawisk, lecz na pewnej prawidłowości zmiany barw lub ich odcienia. Z naszych doświadczeń wynika, że taką prawidłowością jest zmiana temperatury barwy. Zmianę tę daje się zaobserwować dla tego samego zjawiska zawsze w tym samym kierunku. W przypadku zjawiska uszkodzeń drzew barwa zmienia się od najcieplejszej, w przypadku zdrowych drzew, w kierunku zimniejszych barw, w przypadku drzew uszkodzonych, aż do najzimniejszej, charakteryzującej martwe drzewa. Istnienie takiej prawidłowości umożliwia interpretację zdjęć spektrostrefowych nawet przy niecałkowitej jednoznaczności konkretnej barwy. Niepowtarzalność barw na omawianym filmie oczywiście bardzo utrudnia interpretację zdjęć i wymaga przy każdorazowej zmianie skali barw dokładnego przeanalizowania całości odwzorowanego na filmie obszaru i stworzenia klucza za pomocą barw tam właśnie występujących. Przy takim podejściu do interpretacji okazało się, że mimo wszystko można badać zjawiska zachodzące w drzewostanach, zwłaszcza zjawiska powierzchniowe. Konfrontacja zdjęć o różnej skali barw z drzewostanem w terenie i wnikliwa ich analiza pozwoliła stwierdzić, że zmiana temperatury barw w określonym kierunku jest skorelowana ze zmianą zdrowotności drzew też w określonym kierunku. Wykorzystując tę prawidłowość, na podstawie interpretacji spektrostrefowych zdjęć lasów pozostających stale pod wpływem emisji przemysłowych na obszarze GOP, wyróżniono fragmenty drzewostanów zdrowych i uszkodzonych, a w obrębie tych ostatnich trzy strefy uszkodzeń w drzewostanach sosnowych. Należy dodać, że ta ocena była wynikiem dokładnego porównania zmienności barw drzewostanów na zdjęciu ze stanem odpowiadających im fragmentów drzewostanów w terenie. Nie uszkodzone fragmenty drzewostanów miały na zdjęciach barwę ciemnej zieleni z domieszką purpury, a fragmenty zaliczone do I strefy uszkodzeń gubiły domieszkę ciepłej barwy. W miarę pogarszania się stanu zdrowotnego drzew zieleni stawała się coraz zimniejsza przez zmniejszanie się udziału ciepłych barw, aż do najzimniejszej, oznaczającej martwe drzewa. Ta zmiana zabarwienia na zdjęciach z terenu GOP była wyraźnie skorelowana z różnicami w wyglądzie i kondycji drzew ocenionej przez przyrodników.

Dobre rezultaty uzyskano także w przypadku rejestrowania i oceny szkód wyrządzonych w drzewostanie sosnowym żerem pierwotnego szkodnika sosny — poprocha cetyniaka (*Bupalus piniarius* L.). Kilkaset hektarów lasu objętych żerem szkodnika nie tylko zostało dokładnie odróżnione od zdrowego drzewostanu, ale też w obrębie zaatakowanego obszaru można było wyróżnić trzy stopnie nasilenia żeru. Drzewa nie uszkodzone charakteryzowała na zdjęciach barwa purpurowa o pełnym nasyceniu. W miarę nasilania się żeru, którego objawem była redukcja aparatu asymilacyjnego,

barwa purpurowa traciła swe nasycenie i stopniowo rozjaśniając się aż do zniknięcia przechodziła w barwę niebieskozieloną, charakterystyczną dla fragmentów drzewostanu objętych żerem zupełnym. Dodatkowym elementem oceny uszkodzenia drzewa była w tym przypadku struktura koron, która wyraźnie zmieniała się powyżej pewnej granicy redukcji aparatu asymilacyjnego (ok. 60%).

Dla uzyskania najwyższej możliwej wiarygodności interpretacji przy wyróżnianiu klas uszkodzeń w przedziale między drzewami zdrowymi i martwymi jest konieczna wnikliwa analiza obrazów drzew odfotografowanych na zdjęciu w różnych odcieniach purpury i analiza ich rzeczywistych cech określonych w terenie. Całkowicie martwe drzewa natomiast, czyli posusz, nie budzą wątpliwości przy interpretowaniu zdjęć spektrostrefowych nawet mimo niepowtarzalności barw na zdjęciach z różnych obszarów, wykonywanych w różnych terminach. Drzewa martwe, nawet pojedyncze, są doskonale widoczne, wyróżniając się z otoczenia intensywną barwą, najzimniejszą w gamie barw na danym filmie. Jest to najczęściej jaskrawa barwa niebieskozielona, z różnym udziałem jednego lub drugiego koloru. Barwa taka jest wynikiem zmiany spektralnych właściwości drzewa o suchych igłach lub ich pozbawionego. Kora gałęzi bowiem i suche igły odbijają promienie w zakresie barw czerwonych, natomiast minimalne odbicie jest w zieleni i podczerwieni. Reakcja zachodzi zatem w warstwie uczulonej na czerwień, a zabarwianej na purpurowo, eliminując barwę purpurową z obrazu. Słaba reakcja zachodzi w warstwie żółtej uczulonej na zieleni i jeszcze słabsza w warstwie uczulonej na podczerwień, a zabarwionej na niebieskozielono. W wyniku nałożenia się barw żółtej i niebieskozielonej oraz proporcji ich udziału w obrazie drzew uszkodzonych, obraz drzewa przybiera barwę seledynową, zieloną lub niebieskozieloną, tym zimniejszą, im drzewo jest bliższe śmierci. Posusz, jak już zaznaczono, nawet w przypadku pojedynczych drzew jest łatwy w interpretacji, ponieważ całkowicie zmienia barwę w stosunku do drzew zdrowych, podczas gdy uszkodzone drzewa, lecz jeszcze żyjące, zmieniają tylko intensywność barwy charakterystycznej dla zdrowych drzew. Dlatego uszkodzone, ale jeszcze nie martwe fragmenty drzewostanów, można wykrywać na zdjęciach spektrostrefowych w mniejszym stopniu z odczytania kondycji poszczególnych drzew, a raczej ze względu na ich powierzchniowy charakter. Dzieje się tak, gdyż ocena różnic w zabarwieniu odbywa się metodą wizualną. Przy subtelnym różnicach z większą pewnością wyróżnia się bowiem zmianę odcienia barwy, gdy występuje ona na większej powierzchni. Wrażenie zabarwienia tej powierzchni jest takie, jakie nadają jej dominujące na niej drzewa i na podstawie jakości tych drzew odpowiednio oceniony zostaje dany fragment drzewostanu. W taki zresztą sposób w ogóle ocenia się powierzchniowe zjawiska przyrodnicze

z tym, że z ziemi znacznie trudniej dokonać takiej oceny, tak aby była ona jak najbliższa rzeczywistości. Możliwość wyróżnienia i zlokalizowania za pomocą zdjęć lotniczych posuszu w drzewostanie jest bardzo ważne z punktu widzenia pielęgnacji lasu. Usuwanie bowiem w porę martwych drzew, które stają się rozsadnikami szkodników grzybowych i owadzi, jest zasadniczą sprawą dla utrzymania właściwego stanu sanitarnego lasu.

Dobrze czytelne na zdjęciach lotniczych okazały się szkody wyrządzone przez hubę korzeniową (*Trametes radiciperda*), która jest grzybem atakującym młode sośniny, zwłaszcza rosnące na gruntach porolnych. Huba korzeniowa atakuje korzenie drzew, które po pewnym czasie całkowicie zamierają. W opianym przez hubę drzewostanie pojawiają się charakterystyczne gniazda martwych drzew, które należy usunąć. Leśnikom prowadzącym walkę z hubą korzeniową identyfikacja takich gniazd martwych drzew sprawia duże trudności, tym bardziej, że drzewostany atakowane przez tego grzyba to lasy młode, ok. 20-letnie, bardzo zwarte i praktycznie niemożliwe do penetracji terenowej. Gniazda huby można natomiast doskonale zidentyfikować na zdjęciach lotniczych wykonanych dowolną techniką, przy czym spektrostrefowe zdjęcia umożliwiają ponadto określenie kierunku postępowania szkód, powiększania się gniazd martwych drzew oraz łączenia się ich w większe powierzchnie. W tym przypadku pierwszoplanową cechą, pozwalającą na stwierdzenie i identyfikację zjawiska, jest struktura obrazu lasu na zdjęciu lotniczym z charakterystycznymi gniazdami rozsianymi w drzewostanie, a następną barwa drzew na zdjęciu, która wskazuje na rozwój zjawiska. Takie dokładne rozpoznanie ma zasadnicze znaczenie dla opanowania postępujących szkód i uzupełnienia pustych miejsc po wyciętych lub powalonych drzewach, co w tym wieku drzewostanu jest jeszcze możliwe.

Nie wszystkie jednak dotychczasowe eksperymenty są udane. Jak dotąd zawiodą próby wyznaczania obszarów zaatakowanych przez cetyńce. Korona sosny zaatakowanej przez cetyńce zmienia swój kształt w charakterystyczny sposób. W górnej części staje się strzelista przez utratę bocznych pędów, natomiast w części środkowej w zasadzie zachowuje swój kształt. Obraz takiego drzewa na zdjęciu lotniczym nie różni się cechami spektralnymi od obrazu zdrowej sosny. Zasadnicza zmiana kształtu korony spowodowana zerem cetyńców jest doskonale widoczna dla obserwatora z ziemi, natomiast na zdjęciu lotniczym drzewo z opadłą cetyną jest możliwe do odróżnienia od zdrowego w zasadzie tylko na obrazie cieniu rzucanego przez drzewa rosnące na brzegu lasu ocienionym w chwili fotografowania. Obserwacja stereoskopowa zdjęć lotniczych nie wnosi w tym przypadku nowych cech rozpoznawczych ze względu na zbyt subtelny obraz strzelistego wierzchołka korony.

Oprócz opisanych doświadczeń, których wykorzystywanie już przynosi

efekty przy lokalizowaniu i badaniu niektórych powierzchniowych zjawisk zachodzących w lesie, są prowadzone badania o bardziej ogólnym charakterze, których celem jest wzbogacenie wartości informatycznej zdjęć lotniczych lasów.

Obecnie w centrum uwagi znajdują się dwa zagadnienia, których rozwiązanie warunkuje postęp prac nad zastosowaniem fotointerpretacji w leśnictwie. Pierwsze z tych zagadnień sprowadza się do kwestii powstawania obrazu korony drzewa na zdjęciu lotniczym, natomiast drugie dotyczy przetwarzania zbiorów policzalnych cech lotniczego zdjęcia drzewostanu.

Korona drzewa liściastego w pełni sezonu wegetacyjnego, oglądana z góry, przedstawia sobą nieomalże jednolitą powierzchnię utworzoną z elementarnych części, którymi są zewnętrzne powierzchnie liści. Obraz takiej korony powstaje na zdjęciu lotniczym w wyniku zarejestrowania promieniowania elektromagnetycznego odbitego od powierzchni korony, a ściślej rzecz biorąc jest wynikiem całkowania promieniowania odbijanego przez liście. Dlatego też można mówić o istnieniu zależności między charakterystyką spektrofotometryczną liści, określaną laboratoryjnie, a spektralnymi cechami rozpoznawczymi obrazu korony drzewa liściastego na zdjęciu lotniczym. W wyniku badań laboratoryjnych są już znane krzywe odbicia spektralnego liści wielu gatunków drzew. Coraz bardziej są zgodne opinie badaczy co do roli morfologii liścia, zwłaszcza mezofilu, w procesie odbijania promieniowania o różnej długości fali. Coraz bardziej jest poznawany wpływ fizjologicznych zmian w tkance palisadowej i miękiszu gąbczastym, wywołanych określonymi stressami na krzywą odbicia spektralnego. Badania te są prowadzone przez wiele placówek naukowych w świecie, a wyniki, wobec ewidentnej zależności z obrazem drzew liściastych na zdjęciach, są podstawą do licznych zastosowań fotointerpretacji.

Znacznie bardziej jest skomplikowana sytuacja przy analizowaniu powstawania na zdjęciu lotniczym obrazu korony sosny. Wynika ona nie tylko z samej budowy aparatu asymilacyjnego, ale przede wszystkim z kształtu korony sosny. W przypadku koron gęstych, dobrze uigłonych, odbite promieniowanie pochodzi głównie, ale nie wyłącznie, z odbicia od aparatu asymilacyjnego. Mała powierzchnia igły, kąt nachylenia igieł do pędu oraz pędu bocznego do pędu głównego nawet przy prawidłowym uigleniu drzewa czynią, iż płaszcz korony sosny nie może być traktowany jako powierzchnia składająca się z elementów o takich samych własnościach spektralnych. O obrazie korony na zdjęciu lotniczym będą zatem decydowały w części promienie odbite od aparatu asymilacyjnego (głównie od igieł tegorocznych), a w części od prześwietlającej kory gałęzi oraz od inaczej zabarwionych i oświetlonych igieł starszych roczników. A zatem, w zależności od kształtu i gęstości korony w procesie powstawania obrazu sos-

ny będą się zmieniały proporcje ilości odbitego promieniowania elektromagnetycznego o różnej długości fali bez względu na stan fizjologiczny aparatu asymilacyjnego. Przez pojęcie stanu fizjologicznego aparatu asymilacyjnego rozumie się zbiór własności fizyko-chemicznych, morfologicznych i anatomicznych igieł, powodujących określoną charakterystykę spektrofotometryczną promieni odbitych. Zmiany stanu fizjologicznego igieł powodują wprawdzie zmianę krzywej odbicia spektralnego, lecz na obraz korony wpływają tylko w takiej proporcji, w jakiej uczestniczy aparat asymilacyjny w wyglądzie korony sosny oglądanej z góry.

Wynikają stąd ważne wnioski, które muszą być brane pod uwagę w dalszych badaniach naukowych, a mianowicie:

1. Naziemne badania spektrofotometryczne igły sosny, aczkolwiek ważne, to jednak nie rozwiązują, tak jak w przypadku drzew liściastych, problemu mianowania cech spektralnych obrazu korony drzewa na zdjęciu lotniczym.

2. Zmiany zdrowotności drzewa wyrażone zmianami stanu fizjologicznego aparatu asymilacyjnego są bardziej zauważalne na zdjęciu lotniczym drzewa gęsto uigłonego niż na obrazie drzewa o przerzedzonej koronie.

3. Teoretycznie jest możliwa sytuacja, w której dwa drzewa o różnej ażurowości korony i różnym stanie fizjologicznym aparatu asymilacyjnego będą miały te same cechy spektralne obrazów. Ten warunek zobowiązuje do zachowania szczególnej ostrożności przy określaniu stanu zdrowotnego sosny na podstawie spektrostrefowego zdjęcia lotniczego.

Drugim kierunkiem prowadzonych ogólnometodycznych badań naukowych, obok opisanego już zagadnienia powstawania obrazu korony sosny na zdjęciu lotniczym, jest przetwarzanie zbiorów policzalnych cech lotniczego zdjęcia drzewostanu. Na razie badania te koncentrują się na wydobyciu z treści zdjęcia możliwie największej liczby cech policzalnych oraz na ich systematyzowaniu. Głównym celem tych badań jest przedstawienie naukom przyrodniczym, zwłaszcza leśnym, katalogu możliwych do rozróżnienia elementów lotniczego obrazu drzewostanu. Taki katalog będzie — naszym zdaniem — podstawą do podjęcia badań, które w wyniku nadadzą treść przyrodniczą obrazowi lotniczemu lasu.

Obecnie są możliwe do wyróżnienia z treści lotniczego zdjęcia lasu następujące policzalne cechy drzewostanu:

1. Liczba drzew w jednostce powierzchni z możliwością rozróżniania sosny, świerka, brzozy i dębu.

2. Liczba drzew w pierwszej, drugiej, a niekiedy i trzeciej klasie biosocjalnej.

3. Liczba drzew sosnowych z podziałem na trzy kategorie obrazu korony, uszeregowane w kierunku pogarszającej się kondycji drzewa.

4. Liczba drzew sosnowych silnie uszkodzonych, posiadających tylko część tegorocznego aparatu asymilacyjnego.

5. Liczba posuszu czynnego.

6. Liczba posuszu jałowego.

Przyporządkowanie znaczenia przyrodniczego i gospodarczego wymienionym elementom lotniczego obrazu drzewostanu umożliwi przejście do następnego, finalnego etapu prac badawczych nad zastosowaniem fotointerpretacji w leśnictwie. Będzie można bowiem wtedy rozważać możliwość przewarżania zbiorów różnych informacji o lesie, otrzymywanych zarówno w wyniku skorelowania elementów zdjęcia z jego treścią przyrodniczą, jak też otrzymywanych w inny sposób.

Recenzował dr hab. Andrzej Ciołkosz

Rękopis złożono w Redakcji w październiku 1976 r.

ВОЙЦЕХ ВЫХАВСКИ
МАРИЯ ИРАЦКА
ЕЖИ МОЗГАВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ АЭРОСНИМКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

Резюме

В работе представлен опыт Института, полученный в ходе работ по применению аэроснимков в лесном хозяйстве. Особое внимание было посвящено определению пригодности спектрзональных снимков для исследования сосны, которая является доминирующим видом в Польше. Оговорены трудности, которые возникают из черт спектрзональной пленки и из влияния натуральной изменчивости морфологии кроны сосны на форму и цвет её изображения на аэроснимке. Указано на удачное применение этой пленки при обнаруживании промышленных повреждений сосновых древостоев и древостоев, поврежденных биотическими факторами (*Bupalus piniarius* L и *Trametes radiciperda*). Обращено внимание на роль естественных наук, которых исследования должны быть коррелятивны с продвижением работ по расширению возможностей фотоинтерпретационных методов.

WOJCIECH BYCHAWSKI
MARIA IRACKA
JERZY MOZGAWA

APPLICATION OF AERIAL COLOR INFRARED PHOTOGRAPHS FOR PINE FOREST DAMAGE INVESTIGATIONS

Summary

The experience of Institute gained during the works on application aerial photographs in forestry has been shown in this paper. The particular consideration is given to determination of usefulness of color infrared photographs for pine damage investigations. Difficulties, resulting from color infrared film characteristics and from influence of natural variability of pine crown morphology on its shape and colour on the aerial photo, were discussed. The succesful using color infrared film for detecting industrial damages of pine forests and forests damaged by biotic agents (*Bupalus piniarius* L and *Trametes radiciperda*) was described. An attention was given to the part of natural science, whose studies should be correlated with the progress of works on development of photointerpretation methods.