

JANUSZ WOJCIECH BYCHAWSKI

UKD 528.77.029.673:[634.0.42:633.94]

Zastosowanie lotniczych zdjęć spektrostrefowych do określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych

Zarys treści. Praca zawiera szczegółowy opis, opracowanej przez autora, fotointerpretacyjnej metody określania stopnia zagrożenia drzewostanów sosnowych wywołanego przemysłowymi zanieczyszczeniami powietrza. Opis koncepcji metody jest poprzedzony przeglądem aktualnego stanu wiedzy oraz relacją z badań o charakterze podstawowym przeprowadzonych wcześniej w Polsce.

Istotą opisanej metody jest wymierny sposób interpretacji spektrostrefowych zdjęć lotniczych lasu. Polega on na posługiwaniu się liczbowymi wskaźnikami, określanymi w wyniku obserwacji modelu stereoskopowego utworzonego ze zdjęć spektrostrefowych, charakteryzującymi jakość bądź pojedynczych drzew bądź pewnego fragmentu drzewostanu. Takie wskaźniki, brane razem lub rozdzielnie, są dalej traktowane jako tworzywo modelu matematycznego zagrożenia badanych drzewostanów. Funkcja opisująca model jest tak dobierana, aby mógł on reprezentować treść przyrodniczą określoną na podstawie niewielkiej liczby terenowych powierzchni testowych. Metoda została sprawdzona na powierzchni około 4 tysięcy hektarów drzewostanów sosnowych nękanych przez przemysł.

W końcowej części autor prezentuje empirycznie udokumentowaną możliwość wykorzystania istoty opisywanej metody do określania także strat przyrostu mianości drzewostanów wywołanych emisjami przemysłowymi.

1. Wstęp

Dynamicznemu rozwojowi przemysłu w Polsce towarzyszy nie mniej szybko wzrastający poziom zanieczyszczeń powietrza. Wydalane do atmosfery pyły, a zwłaszcza gazy, tworzą coraz to bardziej rozprzestrzeniającą się strefę, w której stężenie ekshalatów przemysłowych jest już na tyle duże, że wywołuje niekorzystne, a niekiedy nawet katastrofalne skutki w ekosystemach leśnych.

Emisje przemysłowe atakują las w różny sposób, w zależności od jego usytuowania względem emitorów, ilości, ciężaru i toksyczności polutantów, wysokości emitorów, warunków atmosferycznych, składu gatunkowego i wieku drzewostanu, wrażliwości gatunkowej drzew, a także w zależności od typu siedliskowego lasu.

Największym zagrożeniem dla lasów nie są pyły, lecz gazy emitowane z kominów zakładów przemysłowych. I aczkolwiek obecność pyłów, za-

równy w aerozolu, jak i w postaci opadów, jest niezmiernie uciążliwa, a w większych dawkach wręcz niebezpieczna dla człowieka i jego środowiska, to jednak z wyjątkiem wielkich aglomeracji przemysłowych destruktywne działanie pyłów ma zasięg ograniczony do stosunkowo niewielkich powierzchni. Ponadto toksyczność pyłów dla drzew, w świetle najnowszych badań, nie jest zbyt oczywista. Najczęściej spotykane zanieczyszczenia pyłowe: sadza, popioły lotne, pyły metalurgiczne, wapienne, cementowe, a zwłaszcza drobne frakcje pyłów kwarcowych i tlenków metali stanowiące bardzo poważne zagrożenie zdrowia ludzi i zwierząt [44], oddziałują na drzewa w znikomym zaledwie stopniu. Nie wyklucza się wprowadzie bezpośredniego oddziaływania pyłów na aparat asymilacyjny w bliskim sąsiedztwie źródeł emisji, natomiast sądzi się [46], że nawet drobne frakcje pyłów nie przenikają przez aparaty szparkowe liści i igieł, a tym samym nie wchodzi w reakcje z substancjami zawartymi w komórkach. Destruktywne działanie pyłów na las jest związane raczej z gromadzeniem się w glebie nierozpuszczalnych związków toksycznych osłabiających ekosystem leśny chociażby poprzez wywoływanie zmian w edafonie.

Inną kwestią pozwalającą traktować obecność pyłów przemysłowych jako uciążliwość o znaczeniu lokalnym i przejściowym (w skali kraju) jest stosunkowo duża sprawność urządzeń odpylających. Odpylanie spalin jest już opanowane w sensie technologicznym. Pozostaje liczyć na to, że w ślad za sprawnością technologiczną przyjdzie poczucie odpowiedzialności i sprawność organizacyjna, która przyniesie wreszcie spodziewany efekt.

Inaczej, niestety, przedstawia się sprawa zanieczyszczeń powietrza gazami emitowanymi przez zakłady przemysłowe.

Nie tylko polskim, lecz światowym problemem jest odsiarczanie spalin. Jest to problem szczególnej wagi zarówno ze względu na toksyczność związków siarki, jak też ilości emisji. I aczkolwiek toksyczne działanie dwutlenku siarki nie jest największe spośród spotykanych polutantów gazowych, to jednak on właśnie ponosi głównie odpowiedzialność za szkody przemysłowe w drzewostanach. Nie bez znaczenia jest tu rozprzestrzenianie się dwutlenku siarki na ogromne przestrzenie spowodowane faktem eksploatowania wysokich kominów. Brzmi to paradoksalnie, jako że wynoszenie emisji na duże wysokości jest przecież spowodowane staraniem o ochronę powietrza atmosferycznego. Jednak wobec dynamicznego wzrostu ilości emisji, wynoszenie ich na duże wysokości powoduje gwałtowny wzrost wielkości powierzchni znajdującej się pod wpływem zanieczyszczonego powietrza. Ten fakt ma istotne znaczenie, wywołując ważny problem oceny skutków już nie tylko katastroficznego, lecz także nękającego wpływu dwutlenku siarki na coraz to większe obszary leśne.

Widomymi oznakami ostrych zatruć sosny dwutlenkiem siarki jest przebarwienie, a następnie opadanie igieł. Zatrucia chroniczne, będące wynikiem długotrwałego, nękającego wpływu mniejszych stężeń dwutlenku siarki objawiają się między innymi zmniejszeniem liczby roczników igieł, przerzedzeniem korony, a z czasem także zmianami w jej pokroju.

W drzewostanach ważnym symptomem uszkodzeń przemysłowych jest postępujący proces wydzielania się posuszu. Znane są przypadki, gdzie masa wydzielonego posuszu wielokrotnie przekraczała ustalony w planach etat roczny [38].

Mechanizm niszczącego działania ekshalatów przemysłowych na las jest niezmiernie skomplikowany i wymienione tu objawy dostrzegane w koronach drzew oraz w drzewostanach nie są, rzecz jasna, wyczerpującym opisem skutków działania tego mechanizmu. Jest jednak faktem, że zewnętrzne objawy zmian w aparacie asymilacyjnym są formalnie i faktycznie uznane w leśnictwie jako wystarczająco symptomatyczne dla określania stopnia uszkodzenia bądź zagrożenia drzewostanów przez przemysł oraz do szacowania wielkości ponoszonych strat.

Uwypuklenie tego faktu ma na celu zwrócenie uwagi na zbieżność źródeł informacji o lesie dostępnych leśnikowi szacującemu wizualnie stopień zagrożenia drzewostanu metodą bezpośrednią (terenową) oraz informacji zawartych w treści zdjęcia lotniczego utworzonego przecież w wyniku rejestracji promieniowania elektromagnetycznego odbitego od koron drzew.

Samo przekonanie o zbieżności źródeł informacji nie stanowi jeszcze o niczym poza tym, że wskazuje pewien obszar dociekań, wspólny obu specjalnościom tj. leśnictwu i fotointerpretacji. Mówiąc inaczej taka zbieżność stwarza szansę wydobywania z treści zdjęcia lotniczego takiej wiedzy o lesie, której treść przyrodnicza i gospodarcza odpowiada potrzebom nauki i praktyki w leśnictwie, a której zdobycie nie będzie wymagało tak dużego jak teraz wydatkowania pracy terenowej.

Wykorzystanie wspomnianej szansy jest ściśle związane ze sposobem zarejestrowania na zdjęciu lotniczym informacji niesionych strumieniem promieniowania słonecznego odbitego od koron drzew, a także z metodą rozszyfrowania zdjęcia lotniczego.

Znalezienie właściwego sposobu zarejestrowania informacji o lesie na zdjęciu lotniczym nie stanowi obecnie problemu badawczego, lecz jest kwestią wyboru. W tym przypadku bezsprzecznie najlepszym sposobem rejestracji informacji o lesie na zdjęciu lotniczym jest technika barwnej fotografii w podczerwieni zwana inaczej fotografią spektrostrefową. Jej szczególną cechą jest to, że obraz na filmie powstaje równocześnie w trzech nałożonych na siebie warstwach emulsji światłoczułej, z których każda jest uczulona wybiórczo tylko na jeden zakres spektrum.

W Polsce używamy filmu spektrostrefowego produkowanego przez firmę Kodak pod nazwą Aerochrome IR 2443.

Przy wyborze liczby i zakresów uczulenia poszczególnych warstw emulsji tego filmu kierowano się zdolnością odbijania promieniowania słonecznego o różnej długości fali od powierzchni zielonych części roślin. Aczkolwiek liście różnych gatunków drzew mają nieco inną charakterystykę spektralną, to jednak mają one jedną wspólną cechę. Wyraża się ona tym, że wszystkie linie rodziny krzywych odbicia spektralnego liści mają dwa maksima i jedno minimum. Jedno maksimum występuje w zakresie zieleni, a drugie — znacznie większe — w zakresie bliskiej podczerwieni. Minimum odbicia przez zielone części roślin występuje w zakresie promieniowania czerwonego [7].

Każda z warstw emulsji filmu spektrostrefowego (Aerochrome IR 2443) jest uczulona na jeden z zakresów odpowiadający ekstremalnym punktom krzywej odbicia spektralnego zielonych części roślin. Dzięki temu zbiór informacji o koronie drzewa zapisany w obrazie spektrostrefowym jest zdeterminowany w głównej mierze obecnością aparatu asymilacyjnego. Jest to pierwszy, znaczący argument dla wyboru sposobu zapisu informacji o lesie na zdjęciu lotniczym.

Obecność warstwy emulsji uczulonej na podczerwień nadaje spektrostrefowemu obrazowi lasu szczególne cechy. Chodzi mianowicie o to, że w tym właśnie zakresie promieniowania, bardziej niż w zakresach widzialnych, uwidaczniają się zmiany żywotności aparatu asymilacyjnego [7], [30]. Stąd właśnie wynika ogólnie znana łatwość odróżniania na zdjęciu spektrostrefowym drzew żyjących od martwych.

Możliwość wykrywania drzew martwych w drzewostanach jest następnym istotnym argumentem przemawiającym za wyborem barwnych zdjęć w podczerwieni, jako właściwego sposobu zapisu informacji o lesie, stwarzającego wspomnianą już szansę sukcesu w badaniach wpływu działalności przemysłu na lasy. Możliwość ta oznacza bowiem, że spektrostrefowe zdjęcia lotnicze pozwalają śledzić proces wydzielania się posuszu, a więc pozwalają określać zasięg i natężenie występowania jednego ze znamienych symptomów przemysłowego zagrożenia drzewostanów.

Rzecz jednak w tym, że aczkolwiek zwiększone wydzielanie się posuszu jest z całą pewnością jednym z symptomów przemysłowego zagrożenia drzewostanów, to jednak możliwe do stwierdzenia na podstawie zdjęć lotniczych natężenie tego procesu może być — i bywa — miarą stopnia zagrożenia drzewostanów [38], [39], lecz tylko w warunkach gospodarki ekstensywnej. W naszych warunkach określanie stopnia zagrożenia drzewostanów li tylko na podstawie liczby drzew martwych w drzewostanie wymagałoby konfrontacji uzyskanego wyniku z rozmianami cięć sanitarnych na moment wykonania zdjęć, co stawia pod zna-

kiem zapytania użyteczność, a nawet i wiarygodność takiego wykorzystywania teledetekcji w leśnictwie.

Z dwóch wymienionych warunków wykorzystania szansy powiązania treści zdjęcia lotniczego z pojęciem przemysłowego zagrożenia drzewostanu tylko pierwszy, tj. wybór techniki rejestracji informacji o lesie na zdjęciu lotniczym można już we wstępie uznać za spełniony. Drugi warunek, czyli znajomość metody rozszyfrowania treści zdjęcia i nadanie jej znaczenia przyrodniczego wymaga przeprowadzenia badań.

W niniejszej rozprawie przedstawiam syntezę części prac badawczych nad zastosowaniem spektrostrefowych zdjęć lotniczych w leśnictwie, jakie prowadziłem w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie w okresie od 1974 do 1979 roku.

Generalną tezę niniejszej pracy jest twierdzenie, iż spektrostrefowe zdjęcia lotnicze zawierają w swej treści wystarczającą ilość informacji, aby na ich podstawie można było określić stopień zagrożenia drzewostanów sosnowych znajdujących się pod wpływem przemysłowych zanieczyszczeń powietrza z zachowaniem przyjętych w polskim leśnictwie kryteriów oceny tego zjawiska.

Teza ta nie znajduje odpowiednika w dostępnej mi literaturze przedmiotu.

W pracy główną uwagę koncentruję na badaniu drzewostanów będących jeszcze we wczesnym stadium uszkodzenia. Mniej uwagi natomiast poświęcam drzewostanom bardzo silnie uszkodzonym. Skupienie uwagi na drzewostanach znajdujących się pod nękającym wpływem nawet stosunkowo małych stężeń zanieczyszczeń wydaje się być bardziej celowe chociażby tylko ze względu na stworzenie w ten sposób możliwości podjęcia przez leśników w porę działań zapobiegawczych. Za potrzebą zajmowania się wczesnymi objawami uszkodzeń przemawia także terytorialny rozmiar tego zjawiska oraz duże trudności wykrywania takich uszkodzeń metodą wizualnej oceny drzewostanów prowadzonej przez służbę leśną.

Przed przystąpieniem do relacjonowania przebiegu prac badawczych i ich wyników pragnę gorąco podziękować wszystkim tym, którzy swoją wiedzą i życzliwością umożliwili mi sformułowanie koncepcji metody oraz jej sprawdzenie.

Gorące podziękowania składam wszystkim tym, którzy z ogromną cierpliwością i wyrozumiałością pozwolili mi korzystać ze swojej wiedzy i doświadczenia w moich żmudnych próbach zrozumienia lasu. Serdecznie dziękuję za to Panom: prof. Tadeuszowi Tramplerowi, prof. Zbigniewowi Sierpińskiemu, dr inż. Jerzemu Mozgawie, dr inż. Bogdanowi Sikorze oraz mgr inż. Krzysztofowi Wolframowi.

Osobne podziękowanie jestem winien Pani mgr Marii Irackiej oraz doc. Andrzejowi Ciołkoszowi. Ich wielkie zaangażowanie i ogromna praca sprawiły, że koncepcja metody opisywanej w tej pracy została zweryfikowana i nabrała cech użytecznych.

2. Aktualny stan wiedzy na temat własności lotniczych zdjęć spektrostrefowych oraz zakresu ich wykorzystywania w badaniu uszkodzeń lasu

2.1. Własności spektrostrefowych zdjęć lotniczych lasu

Barwy obrazu na zdjęciu spektrostrefowym nie mogą być barwami naturalnymi, ponieważ są wynikiem wizualizacji obrazu utworzonego także przez odbite promieniowanie podczerwone, które jako nie odbierane zmysłem wzroku, nie ma swojej barwy. Trzeba było zatem obrazowi utworzonemu w podczerwieni nadać barwę umowną.

W Związku Radzieckim i w NRD są wykorzystywane filmy spektrostrefowe dwu- i trójwarstwowe produkcji radzieckiej. W Polsce wykorzystujemy film spektrostrefowy Kodak Aerochrome IR 2443.

Używany w Polsce film spektrostrefowy ma trzy warstwy, z których dwie są uczulone na promieniowanie widzialne (czerwone i zielone), a trzecia na promieniowanie niewidzialne (podczerwone). Ponadto, każda z tych warstw jest uczulona na promieniowanie niebieskie, które jest jednak zatrzymywane w chwili ekspozycji odpowiednim filtrem. Z całego strumienia promieniowania słonecznego odbitego od korony drzewa na filmie spektrostrefowym może być zatem zarejestrowane tylko promieniowanie w tych trzech zakresach długości fal tj. zielonym, czerwonym i podczerwonym. Tak więc już w chwili naświetlenia filmu następuje selekcja strumienia promieniowania odbitego od korony drzewa z ograniczeniem tylko do tych zakresów, które odpowiadają ekstremom krzywej odbicia spektralnego zielonych części roślin. Dzięki temu zbiór informacji o koronie drzewa zawarty w obrazie spektrostrefowym jest zdeterminowany w głównej mierze obecnością aparatu asymilacyjnego.

Film spektrostrefowy Kodak Aerochrome IR 2443 został tak skonstruowany, że obraz utworzony w warstwie uczulonej na zieleń jest zabarwiony na żółto, w warstwie uczulonej na promienie czerwone ma barwę purpurową, natomiast obraz utworzony w warstwie uczulonej na podczerwień jest zabarwiany na niebiesko-zielony.

Natężenie barwy określonej warstwy emulsji po wywołaniu odwracalnym jest odwrotnie proporcjonalne do natężenia padającego na film promieniowania o charakterystyce zgodnej z sensybilizacją tej warstwy. W efekcie naświetlenia i wywołania filmu spektrostrefowego otrzymuje się w każdym punkcie obrazu nałożone na siebie trzy filtry o różnej gęstości: żółty, purpurowy i niebiesko-zielony.

Jeżeli diapozytyw filmu spektrostrefowego, traktowany jako zestaw nałożonych na siebie trzech takich filtrów, będzie oglądany w przechodzącym świetle białym, to w wyniku ich subtraktywnego działania, do oka ludzkiego dotrą informacje potrzebne do funkcjonowania fizjologicznego procesu postrzegania przez człowieka wszystkich możliwych barw i ich odcieni. Jest to ważne stwierdzenie, mające znaczenie przy konstruowaniu zasad fotointerpretacyjnej metody określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów. Stwarza ono bowiem przesłankę upoważniającą do traktowania zmienności barwy jako zmiennej ciągłej, a tym samym uzasadnia prawo do posługiwania się równaniami regresji.

Śledząc krok po kroku sposób tworzenia się barwy obrazu na filmie spektrostrefowym można się przekonać, że zmienność barwy powinna być związana ze zmianami zachodzącymi w koronie drzewa [4], [30]. Drzewo zdrowe, z prawidłowo rozwiniętym aparatem asymilacyjnym — jak to wiadomo z badań spektrometrycznych [7] — odbija dużo promieni podczerwonych, około trzykrotnie mniej promieni zielonych i jeszcze mniej czerwonych. W takich to mniej więcej proporcjach zostaną naświetlone emulsje poszczególnych warstw filmu. W wyniku wywołania odwracalnego najjaśniejszy będzie filtr niebiesko-zielony, około trzykrotnie bardziej gęsty będzie filtr żółty i nieco bardziej gęsty od niego filtr purpurowy. Do oka obserwatora oglądającego diapozytyw w białym świetle przechodzącym dotrze obraz, którego barwa będzie wypadkową działania trzech filtrów subtraktywnych. Bardzo przeźroczysty filtr niebiesko-zielony zatrzyma tylko trochę światła czerwonego. Na filtr żółty padnie zatem w nie zmienionej ilości światło niebieskie i zielone oraz nieco osłabione światło czerwone. Filtr żółty zatrzyma około trzykrotnie więcej światła niebieskiego, nie reagując na światło zielone i już nieco osłabione czerwone. Na filtr purpurowy padnie więc światło zielone, nieco osłabione czerwone i trzykrotnie bardziej osłabione niebieskie. Filtr purpurowy osłabi silnie światło zielone nie reagując na pozostałe padające nań składowe światła białego. Ostatecznie do oka obserwatora dotrze w przewadze światło czerwone z domieszką niebieskiego i zielonego, tworząc w ten sposób obraz korony drzewa z dobrze rozwiniętym aparatem asymilacyjnym.

Jeżeli aparat asymilacyjny ulegnie redukcji lub przebarwieniu, to

zmieniają się w proporcje odbicia światła w poszczególnych zakresach spektrum. Zmniejszy się odbicie w zieleni i w podczerwieni, a wzrośnie odbicie w zakresie czerwieni. Wzrostu odbicia w czerwieni można się spodziewać również wtedy, gdy z jakiś względów został zakłócony proces asymilacji, nawet bez redukcji aparatu asymilacyjnego. W organizmie drzewa następuje wówczas ograniczenie zdolności do pochłaniania promieni czerwonych niezbędnych do funkcjonowania procesów życiowych [27] co sprawia, że zostają one w większym stopniu odbijane, a więc i rejestrowane na filmie. W wyniku zmiany proporcji odbicia poszczególne filtry powstałe po wywołaniu filmu zmieniają swoje gęstości. Filtry żółty i niebiesko-zielony pochłoną więcej niż poprzednio światła niebieskiego i czerwonego, natomiast filtr purpurowy przepuści więcej światła zielonego. W efekcie barwa obrazu korony drzewa zmieni się z czerwonej z domieszką niebieskiej i zielonej na zieloną z domieszką czerwonej i niebieskiej.

Podany przykład tworzenia się barwy spektrostrefowego obrazu korony drzewa stanowi także przesłankę upoważniającą do postawienia tezy o istnieniu ogólnej zależności między barwą obrazu a charakterystyką aparatu asymilacyjnego.

2.2. Przegląd osiągnięć zagranicznych ośrodków teledetekcji

Film spektrostrefowy został swego czasu wyprodukowany dla potrzeb wojska z myślą o stworzeniu możliwości łatwego rozróżniania na zdjęciach lotniczych roślin żywych od ściętych, a więc zamierających lub martwych, używanych do maskowania obiektów wojskowych [4], [7]. Jest zatem zrozumiałe, że z chwilą udostępnienia tej techniki służbom cywilnym jej wykorzystanie sprowadzało się do wykorzystania tego filmu do wykrywania martwych drzew.

Krąg osób i instytucji eksperymentujących w tej dziedzinie jest obecnie bardzo duży. Na odbytym w 1978 roku w Stanach Zjednoczonych sympozjum poświęconym w całości zastosowania teledetekcji w badaniach uszkodzeń roślinności ogłoszono ponad 30 referatów, z których większość to doniesienia o próbach wykorzystywania filmu spektrostrefowego w leśnictwie. Materiały z tego sympozjum są wprawdzie swego rodzaju aktualnym kompendium na temat wykorzystywania teledetekcji w badaniach uszkodzeń roślinności, lecz bibliografia tematu jest znacznie bogatsza, liczby bowiem ponad 400 pozycji. Nie sposób zatem w całości omówić światowy wysiłek nauki w tej dziedzinie.

W dużej części doniesień naukowych traktuje się o próbach wykorzystywania spektrostrefowej fotografii lotniczej do badania uszkodzeń

drzew gatunków liściastych. Z punktu widzenia tematu niniejszej rozprawy te doniesienia mają stosunkowo małe znaczenie. Są one niekiedy ciekawe ze względów poznawczych, lecz ich znaczenie jest dodatkowo zmniejszone ze względu na to, że mają one charakter raczej sporadycznych przedsięwzięć badawczych. Świadczą o tym przykłady. W stanie Minnesota (USA) badano w latach 1971—1973 zasięg porażenia dębu [41], a w 1975 r. uszkodzenia wiązu [10]. W obu przypadkach autorzy opracowań sceptycznie oceniają osiągnięte wyniki, zwracając uwagę na brak przyrodniczych kryteriów oceny uszkodzeń korespondujących z zasobem informacji na zdjęciach lotniczych. Natomiast podobne prace prowadzone w okolicach Freiburga (RFN), gdzie badano uszkodzenia drzew liściastych rosnących na poboczach dróg, zostały uznane jako udane [21].

Trudności w ocenie sukcesu oraz ocenie skuteczności określonego zastosowania fotografii lotniczej są obecnie traktowane jako znaczący problem teledetekcji [31], [35]. Tym też, między innymi, można tłumaczyć dość wyraźnie zarysowany nurt badań w zakresie metodyki teledetekcji traktujących głównie o zależnościach między treścią zdjęć a różnymi cechami drzew. Dość liczna grupa badaczy zajmuje się laboratoryjnymi badaniami charakterystyk spektralnych, próbując tą drogą dojść do sformułowania nieintuicyjnych zasad interpretacji zdjęć [23], [24], [30]. W przypadku drzew liściastych ten kierunek badań metodycznych wydaje się dość obiecujący, chociaż jak dotąd brak jest doniesień o znaczącym sukcesie, nie licząc informacji o charakterze ofert handlowych [13], nie zawierających — rzecz jasna — udokumentowania merytorycznego.

Temat niniejszej rozprawy skłania do poświęcenia większej uwagi doniesieniom naukowym o zastosowaniu teledetekcji w badaniach uszkodzeń drzew gatunków iglastych.

W najbardziej ogólnym ujęciu daje się zauważyć dwa różniące się kierunki poszukiwań skutecznego zastosowania spektrostrefowych zdjęć lotniczych. Jeden z nich dotyczy badań nad określaniem uszkodzeń lasu wywołanych czynnikami biotycznymi, natomiast drugi czynnikami abiotycznymi, w tym także uszkodzeniami przemysłowymi.

Charakterystyczną cechą większości prac nad wykorzystaniem teledetekcji w badaniach uszkodzeń spowodowanych czynnikami biotycznymi jest preferowanie zasady wielokrotnego wykonywania zdjęć tego samego obszaru i wnioskowanie na podstawie diachronii o zachodzących zmianach. Jako pierwsze, zakończone sukcesem, badanie z wykorzystaniem tej zasady było określanie uszkodzeń drzewostanów daglezwowych w północnej Kalifornii (USA) w czasie rodzącej się w 1968 r. gradacji szkodnika *Dendroctonus pseudotsugae* [17]. Udało się wówczas określić obszary leśne uszkodzone w różnym stopniu [43]. Dobrym przykładem są także

prace przeprowadzone w Szwecji w 1972 roku [1]. Badano tam wówczas możliwość wczesnego wykrywania uszkodzeń świerka norweskiego (*Picea abies*) powodowanych przez kornika drukarza (*Ips typographus*) posługując się zdjęciami spektrostrefowymi pól testowych wykonanymi w trzech terminach. Równocześnie z nalotami były wykonywane bardzo szczegółowe badania terenowe. W konkluzji stwierdzono, że porażenie drzew przez szkodnika można wykryć na zdjęciach około trzech tygodni wcześniej niż to jest możliwe na podstawie naziemnej obserwacji zmiany zabarwienia igieł. Badanie drzewostanów atakowanych przez szkodniki owadzie, z wykorzystaniem zdjęć wykonywanych w różnych terminach, były prowadzone także w górach Black Hills (USA) [17].

Zastosowanie teledetekcji do badania przemysłowych uszkodzeń roślinności, w tym także lasów, nie ma bogatej bibliografii. Ponadto na tej i tak ubogiej liście przeważają opracowania spekulatywne, sygnalizujące potencjalne możliwości teledetekcji, co świadczy raczej o początkowym stadium zaangażowania nauki w tej dziedzinie [3], [6], [40].

Na uwagę zasługuje dość szczegółowa relacja o przebiegu prac nad zastosowaniem radzieckiego filmu spektrostrefowego do inwentaryzowania przemysłowych uszkodzeń drzewostanów świerkowych w Niemieckiej Republice Demokratycznej [33]. Po kilku latach prac przygotowawczych Państwowe Przedsiębiorstwo Projektowania Lasów w Poczdamie przystąpiło w 1977 r. do pierwszego zastosowania spektrostrefowych zdjęć lotniczych na większą skalę (ok. 11 tys. ha drzewostanów świerkowych). W sensie metodycznym inwentaryzowanie uszkodzeń polega tu na wykorzystaniu klucza interpretacyjnego obejmującego cztery klasy uszkodzeń: drzewa zdrowe, nieznacznie uszkodzone, silnie uszkodzone oraz drzewa martwe z tym, że oznaczenie klucza opiera się na słownym opisie barwy obrazu drzew różnie uszkodzonych. Podkreśla się trudności w odróżnieniu drzew zdrowych od nieznacznie uszkodzonych. Z tego zapewne względu przyjmuje się, iż wartość użytkową mają tylko dwie klasy tj. klasa drzew zdrowych i silnie uszkodzonych. Stopnie uszkodzeń drzewostanów określa się na podstawie zdjęć, oznaczając w sposób taksacyjny procentowy udział silnie uszkodzonych drzew z uwzględnieniem liczby drzew martwych traktowanej jako cecha poboczna. Ta metoda fotointerpretacyjna jest traktowana jako paralelna do stosowanej w NRD terenowej metody inwentaryzowania przemysłowych uszkodzeń drzewostanów świerkowych. Brak jest jeszcze danych co do zgodności wyników stosowanych obu tych metod, natomiast mówi się o potrzebie przeprowadzenia kontroli terenowej taksacji uszkodzeń wykonywanej na podstawie zdjęć. Jako przyczynę potrzeby przeprowadzania takich kontroli podaje się obawę o wystąpienie błędów systematycznych powstających przy zestawianiu i stosowaniu klucza interpretacyjnego (opartego — jak

wspomniałem — na słownym opisie barwy na zdjęciu). Tę kwestię chciałbym podkreślić, polecając ją szczególnej uwadze podczas zapoznania się z przebiegiem i wynikami polskich prac naukowo-badawczych zrelacjonowanych w dalszej części niniejszej rozprawy. Nasze prace (opublikowane w tym samym czasie, co niemieckie) od początku były prowadzone z myślą o uwolnieniu się od słownego opisu barwy obrazu korony drzewa na zdjęciu spektrostrefowym, jako zwodniczego w przypadku badania uszkodzeń sosny. Nie oznacza to oczywiście, że tak musi być w przypadku badania świerka chociażby z racji innej budowy korony, większego uiglenia i innej zapewne reakcji świerka na obecność polutantów. Sądzę, że już niedługo dojdzie do konfrontacji poglądów w tej — moim zdaniem — niezmiernie ważnej kwestii tj. wtedy, gdy nasze skromne jeszcze polskie doświadczenia nad badaniem uszkodzeń świerka osiągną poziom porównywalny z posiadanymi już doświadczeniami nad badaniem sosny.

Doniesienia spotykane w literaturze, a traktujące o badaniach sosny są więcej niż skromne. Trudno jest dojść przyczyn absencji doniesień naukowych w tej dziedzinie zastosowań teledetekcji. Po części może to być spowodowane charakterystyczną dla zachodnioeuropejskich i amerykańskich ośrodków powściągliwością w relacjonowaniu szczegółów o użytych metodach i warsztacie pracy. Dotyczy to z reguły opracowań uwieńczonych sukcesem. Wtedy publikacja zawiera z reguły tylko silnie wyeksponowany wynik eksperymentu. Być może, że do takich właśnie należą przeprowadzone w 1969 r. badania przemysłowych uszkodzeń sosny w górach na wschód od Los Angeles [17]. Mówi się tam o wykorzystaniu filmu spektrostrefowego do badania dużych powierzchni lasu metodą reprezentacji. Uzyskaną dokładność określa się błędem 11% liczby drzew uszkodzonych.

Na podstawie innych źródeł ([31], [34], [36], [43]) można jednak nabrać przekonania, że faktycznym powodem braku liczących się opracowań na temat badania uszkodzeń sosny — oprócz dużej zmienności osobniczej wewnątrz tego gatunku, wywołującej trudności w interpretacji zdjęć — jest brak powszechnie uznawanych kryteriów przyrodniczych, a zwłaszcza definicji wczesnego stadium uszkodzenia drzew korespondującej z możliwościami teledetekcji. Ciekawą próbą uporządkowania tej sprawy jest system fotointerpretacyjnej klasyfikacji uszkodzeń drzew gatunków liściastych i iglastych opracowany w 1972 r. dla lasów kanadyjskich [29]. Są propozycje traktowania tego systemu jako podstawę do ujednolicenia pojęć przyrodniczych w powiązaniu z fotointerpretacyjnymi cechami rozpoznawczymi.

*2.3. Wyniki polskich badań w zakresie metodyki fotointerpretacji
nad wykorzystywaniem spektrostrefowych zdjęć lotniczych
do określania stanu aparatu asymilacyjnego sosny*

Aktualny stan nauki i praktyki w polskim leśnictwie sprawia, że teledetekcja znajduje się w dogodnej sytuacji istnienia wymiernych kryteriów oceny stopnia przemysłowych uszkodzeń drzewostanów sosnowych. To sprawia, że rolą teledetekcji w Polsce jest stworzenie takich sposobów interpretacji zdjęć lotniczych i przetwarzania uzyskanych stąd informacji, aby wyniki były jakościowo adekwatne do jasno już sprecyzowanych potrzeb leśnictwa. Temu służyły zrelacjonowane tu badania podstawowe w zakresie wymiernej interpretacji lotniczych zdjęć spektrostrefowych, tej też myśli jest podporządkowana fotointerpretacyjna metoda określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych, zaprezentowana w 3, 4 i 5 rozdziale niniejszej rozprawy.

Jeżeli wykorzystywaną cechą zdjęć spektrostrefowych ma być barwa obrazów koron drzew, to należy stworzyć możliwość określania barwy w sposób wymierny.

W przeprowadzonych rozważaniach, mających na celu tylko wykazanie pewnych tendencji wynikających z istoty odwzorowania spektrostrefowego, wystarczyło operowanie opisem słownym (np. „barwa czerwona z domieszką zielonej i niebieskiej”, „przewaga zieleni” itp.). Nie sposób jednak badać przyczyny różnicowania barw operując tak mało precyzyjnymi określeniami.

W przypadku spektrostrefowego zdjęcia lotniczego, zwłaszcza sosny, nie można tracić z pola widzenia procesu generalizacji, jaki towarzyszy tworzeniu się obrazu. W wyniku tego procesu punktowi na obrazie odpowiada pewna elementarna powierzchnia korony, której wielkość zależy od skali zdjęcia. Barwa takiego punktu zawiera w sobie informacje, których źródłem jest promieniowanie odbite od wszystkich elementów korony drzewa tworzących w sumie wspomnianą powierzchnię korony. Należy zatem sądzić, że barwa punktu na zdjęciu nie zależy wprost od charakterystyki spektralnej igieł (znanej z badań spektrometrycznych), lecz od charakterystyki spektralnej zespołu elementów, jakim jest powierzchnia korony. Charakterystyka spektralna takich powierzchni powinna być więc różna w zależności od ilości i rozmieszczenia igieł zarówno w przypowierzchniowej warstwie, jak i w głębi korony sosny. Tam, gdzie w przewodzie występuje zielone igliwie krzywa odbicia powinna zachować kształt zbliżony do typowej dla zielonych części roślin. W miejscach, gdzie igieł ubył, charakterystyka spektralna elementarnej powierzchni korony może się zmienić, jako że odbicie światła może teraz następować również w głębszych warstwach korony, na przykład od kory gałęzi. Nie

można a priori wykluczyć, że na obrazy bardzo przerzedzonych koron nie wpłyną po części również promienie odbite od dna lasu. Zmiana charakterystyki spektralnej elementarnej powierzchni korony może nastąpić także wówczas, gdy w przewodzie występuje igliwie przebarwione (martwe). Chcąc zatem wydobyć ze spektrostrefowego obrazu lotniczego korony sosny zarejestrowane w nim informacje, należy obraz korony traktować jako zbiór różnobarwnych, a więc i różnoczynnych punktów.

Doświadczenie uczy, że obrazy koron sosen na zdjęciu spektrostrefowym można przyrównać do mozaiki składającej się zaledwie z kilku, dość łatwo odróżnialnych od siebie barw. To stwierdzenie bynajmniej nie zaprzecza przesłance o ciągłości funkcji opisującej zmienność barwy. Domniemając bowiem istnienie takiej funkcji mam na myśli charakter zjawiska, a nie możliwość jego postrzegania w praktyce.

Nasze doświadczenia zdobyte w wyniku kilkuletniej pracy na zdjęciach spektrostrefowych upoważniają do operowania czterema wyraźnie różniącymi się barwami, które w różnych proporcjach uczestniczą w tworzeniu się wypadkowej barwy obrazu korony sosny.

Na podstawie bardzo licznych konfrontacji różnych zdjęć z terenem udało się sformułować zasadę, która głosi, że wzrostowi kondycji drzewa towarzyszy zmiana barwy na zdjęciu w kierunku barw cieplejszych [5], [19].

Ta pozornie mało precyzyjna zasada pozwoliła mi jednak na opracowanie sposobu wymiernej oceny barwy obrazu korony sosny na zdjęciu spektrostrefowym. Ten sposób — jak się okazało w praktyce — odznacza się znacznym obiektywizmem oceny barwy dokonywanej przez różnych obserwatorów. Ponadto ocena barwy dokonywana tym sposobem jest wyrażana liczbą, zwaną dalej „wskaźnikiem barwy”. Operowanie takim wskaźnikiem umożliwia zaangażowanie aparatu matematycznego przy badaniu przyczyn zróżnicowania barw, jak też umożliwia operowanie równaniami regresji łączącymi znaczeniowo fotointerpretacyjne cechy obrazów koron drzew z przyrodniczą wymową tych cech.

Do pojęciowego skonstruowania wskaźnika barwy wykorzystuję wszystkie dotąd wymienione cechy fotografii spektrostrefowej wynikające zarówno z teorii, jak i z praktyki.

Punktem wyjścia jest empirycznie stwierdzony sposób percepcyjnego zjawiska zmienności barwy wyrażony ograniczoną liczbą (n) barw (B) możliwych do bezspornego rozróżnienia przez obserwatora w spektrostrefowym obrazie korony sosny.

Zbiór barw B_i (od $i = 1$ do $i = n$) może być uszeregowany od barwy najzimniejszej (zielonej) B_1 oznaczającej drzewo martwe do B_n w kolejności wzrastania temperatury barw. Jeżeli teraz barwom B zostaną przyporządkowane jakiegokolwiek liczby od N_1 do N_n uszeregowane w kierunku

ku wzrastającym, to w myśl zasady ocieplania się barw w miarę wzrostu jakości aparatu asymilacyjnego nazwa barwy B_i dana teraz w postaci liczby N_i staje się cechą fotointerpretacyjną. Wiadomo o niej narazie tyle, że jej zmienność jest zgodna z kierunkiem zmienności cechy jakości drzewa od najgorszej ku najlepszej.

Proces generalizacji tłumaczący mozaikową strukturę barw obrazu korony sosny upoważnia do traktowania wielkości powierzchni obrazu korony zajętej przez każdą z barw B jako wag, których znajomość jest wymagana w obliczu potrzeby określania średniej barwy obrazu całej korony.

Tak więc interpretator przystępujący do obserwacji zdjęcia spektrostrefowego dysponuje określoną listą wyróżnialnych barw w postaci szeregu liczbowego $N_1, N_2, \dots, N_n$. Rolą interpretatora jest oszacowanie udziału każdej z tych barw w powierzchni obrazu korony obserwowanej sosny. Przyjąłem, że szacunek będzie dokonywany w postaci zespołu liczb $p_1, p_2, \dots, p_n$, z których każda określa w dziesiątkach procentów udział sobie właściwej barwy w powierzchni obrazu korony.

W tej sytuacji każdemu z obserwowanych obrazów można przyporządkować barwę średnią w przedziale barw oznaczonych liczbami od N_1 do N_n , jako średnią ważoną wagami p . Wobec tego, że $\sum p = 10$ (z założenia), to poszukiwaną średnią można określić z wzoru:

$$N = 0,1 \sum_{i=1}^{i=n} N_i p_i \quad (1)$$

Taki wyraz barwy odnosi się do przedziału liczbowego $N_1 \div N_n$, a więc jest uzależniony od umowy, jaką jest przyjęcie takich a nie innych liczb N_i określających wyróżnialne barwy. Chcąc uwolnić się od skutków przyjętej umowy, a tym samym umożliwić w miarę potrzeby swobodę doboru liczby (n) wyróżnialnych barw oraz ich liczbowych nazw (N_i) dobrze jest operować nie wskaźnikiem N (1), lecz standaryzowanym wskaźnikiem b , zwanym dalej **wskaźnikiem barwy**. Zależność między oznaczeniem barwy N a wskaźnikiem barwy b określa wzór:

$$b = \frac{N - N_1}{N_n - N_1} \quad (2)$$

Jeżeli barwą otwierającą przedział jest barwa B_1 o nazwie N_1 (barwa drzewa martwego), to ciąg liczbowy wag obrazu wyrazi się liczbami $p_1 = 10, p_2 = \dots = p_n = 0$. Wobec tego, zgodnie z (1) wielkość N równa się N_1 . Wielkość wskaźnika barwy obliczona z (2) wynosi $b = 0$. Jeżeli natomiast obraz korony drzewa jest utworzony wyłącznie z barwy zamykającej przedział (B_n), liczbowy ciąg wag można zapisać jako $p_1 = p_2 =$

$= \dots = p_{n-1} = 0$, $p_n = 10$. Wówczas $N = N_n$, natomiast wskaźnik barwy określa się jako $b = 1$.

Pojęciowo wskaźnik barwy jest interpretowany następująco:

— Barwa obrazu drzewa martwego na zdjęciu spektrostrefowym może być traktowana jako niezmienna. Wobec tego wskaźnik $b = 0$ oznacza zawsze drzewo martwe;

— Barwa zamykająca przedział wyróżnialnych barw (B_n) jest z założenia barwą najcieplejszą spośród wszystkich n barw występujących w obrazach korony sosny. Stąd też wskaźnik barwy $b = 1$ może być traktowany jako fotointerpretacyjna cecha rozpoznawcza związana z pojęciem korony sosny „wyobraźalnie najlepszej”. Pragnę podkreślić, że nie jest istotne, czy tak nieprecyzyjne określenie ma definicję przyrodniczą. W tym przypadku chodzi tylko o to, aby wykazać, że wzrostowi wskaźnika barwy ku wielkości $b = 1$ towarzyszy — na razie jeszcze hipotetycznie — wzrost jakości aparatu asymilacyjnego.

We wszystkich badaniach, które będą dalej relacjonowane, wykorzystuję wskaźnik barwy przy założeniu, że lista rozróżnialnych barw składa się z czterech pozycji ($n = 4$). Słowne określenie barw wchodzących w skład tej listy bywało oczywiście różne, w zależności od gamy barw, w których było odwzorowane zdjęcie. Zawsze jednak barwą otwierającą przedział (B_1) była zieleń charakteryzująca — jak wiadomo — obraz drzewa martwego. W każdym przypadku obowiązywała również umowa, w myśl której barwie B_1 była przyporządkowana nazwa w postaci liczby $N_1 = 1$. Barwom pośrednim B_2 i B_3 oraz barwie zamykającej przedział (B_4) przyporządkowano nazwy w postaci liczb $N_2 = 2$, $N_3 = 3$, $N_4 = 4$.

Warto zwrócić uwagę, że tej umowie towarzyszy podtekst sprowadzający się do stwierdzenia, że przyjęcie kolejnych liczb naturalnych jako nazw barw oznacza także liniową zmianę zasobu informacji o jakości badanych drzew przy przejściu od barwy do barwy, w kolejności ich uszeregowania.

W tym przypadku są pewne przesłanki do przyjęcia takiej zasady, a więc i nazwania barw kolejno po sobie następującymi liczbami naturalnymi. Lista wyróżnialnych barw, ograniczona tu tylko do czterech pozycji, w rzeczywistości jest nieco dłuższa, zwłaszcza po nabraniu wprawy przez interpretatorów. Ograniczający tę listę wybór nie jest całkiem przypadkowy, opiera się bowiem na bogatym już doświadczeniu zdobytym w wyniku konfrontacji lotniczych zdjęć spektrostrefowych lasu z wyglądem drzew oglądanych z ziemi. Te doświadczenia, nie będące jeszcze badaniami sensu stricto, upoważniły jednak do przyjęcia takiego odstępu między wyróżnialnymi barwami, który w ogólności był w zgodzie z dostrzegalnymi zmianami w wyglądzie koron drzew znajdujących się w różnych stadiach degradacji (zmiana liczby roczników igieł, prześwie-

tlenie korony itp.). Jak widać, nie były to precyzyjne kryteria ustanowienia listy wyróżnialnych barw. Wyniki późniejszych badań nie zaprzeczyły słuszności tych kryteriów. Świadczy o tym chociażby fakt, iż — jak to się okaże — wystarczającym opisem zależności między wskaźnikiem barwy a wskaźnikiem przemysłowego zagrożenia drzewostanu jest funkcja liniowa.

Z przedstawionego opisu może wynikać, że określenie wskaźnika barwy jest bardzo pracochłonne i subiektywne. W praktyce okazało się, że aczkolwiek na pewno jest to czynność wymagająca wprawy, obycia ze zdjęciami i wytężonej uwagi obserwatora, to jednak jej opanowanie nie nastęrcza większych trudności pod warunkiem dobrego widzenia stereoskopowego i umiejętności rozpoznawania barw. Wprawny obserwator jest w stanie w ciągu godziny określić wskaźniki barwy dla około 200 drzew, co może być reprezentacją kilkudziesięciu hektarów lasu.

Osobną kwestią jest dokładność określenia wskaźnika barwy, którą można traktować jako liczbowy wyraz możliwości postrzegania zmienności barw na spektrostrefowym zdjęciu lotniczym. Badanie dokładności przeprowadzałem wielokrotnie, zarówno z udziałem wprawnych obserwatorów, jak również osób zapraszanych, których jedynym przygotowaniem było zaznajomienie się z regułami postępowania. Z porównania licznych obserwacji wskaźnika barwy dokonywanych przez różne, mało wprawne osoby wynika, że średni błąd jest rzędu $m_b = \pm 0,06$ przedziału liczbowego od 0 do 1 (tzn. $\pm 6\%$). Dokładność oceny wskaźnika barwy po nabraniu wprawy określam wielkością $m_b = \pm 0,03$. Możliwa do uzyskania dokładność określenia wskaźnika barwy informuje także o tym, na ile kategorii (części) można wiarygodnie podzielić ocenę jakości korony drzewa wyrażoną zmianą wskaźnika barwy. Z podanych wielkości wynika, że wprawny obserwator może tak dokładnie zaobserwować wskaźnik barwy, iż będzie można wydzielić nawet 10 kategorii licząc od drzewa martwego do „wyobraźalnie najlepszego”.

Poświęcenie wskaźnikowi barwy tyle uwagi wynika i z tego, że to pojęcie nie ma swojego odpowiednika w literaturze (z wyjątkiem publikacji, których jestem współautorem [5], [6], [19]), jak również ze znaczenia roli tego wskaźnika, jaką on pełni we wszystkich dalej relacjonowanych badaniach.

Podstawową kwestią z punktu widzenia użyteczności zjawiska zmienności barw koron sosny na zdjęciu spektrostrefowym jest znajomość wpływu tych czynników, które hipotetycznie mogą mieć swój udział w tworzeniu się barwy zdjęcia i których obecność może zniszczyć ową użyteczność. Do takich, najbardziej niepożądanych czynników zaliczam osobniczą zmienność geometrii sosny (kształt i wymiary) oraz naturalną obecność martwego igliwia poniżej punktu kompensacyjnego. Uważam

bowiem, że w zasadzie tylko te dwa czynniki, gdyby znacząco uczestniczyły w tworzeniu zróżnicowania barw, mogą zniweczyć użyteczność tego zjawiska nawet wówczas, gdy zmienność barwy byłaby po części także wynikiem poszukiwanych zmian stanu aparatu asymilacyjnego.

Inne czynniki, których wpływy nie mogą być a priori wykluczone, a które również należy zaliczyć do niepożądanych, wydają się być łatwiejsze do wyeliminowania. Mam tu na myśli ewentualny wpływ typu siedliskowego lasu, bonitacji siedliska, wieku drzewostanu, jak też stanowiska socjalnego badanych drzew w drzewostanie. Te czynniki, nawet gdyby istotnie kształtowały barwy obrazu lotniczego, to dla wyeliminowania ich wpływów wystarczy odnosić badania stanu zdrowotnego drzew do drzewostanów jednorodnych siedliskowo, bonitacyjnie i wiekowo, jako że te informacje mogą być dane interpretatorowi zdjęć. Podobnie ma się sprawa wyeliminowania ewentualnego spływu stanowiska socjalnego zajmowanego przez badane drzewo. Obserwując model stereoskopowy lasu wprawny interpretator (zwłaszcza, gdy jest leśnikiem) może bez trudu odróżnić drzewostan panujący od podrzędnego, a tym samym ma możliwość pominąć drzewa opанowane, jak również górujące.

Inaczej trzeba traktować wcześniej wymienione czynniki, a więc zmienność osobniczą budowy korony sosny oraz naturalne oczyszczanie się drzew z gałęzi. Jest to związane z ewentualnym wpływem dość dużej ażurowości korony sosny. Istnienia takiego wpływu także nie można wykluczyć zwłaszcza ze względu na związaną z tym obawę o modyfikację barwy obrazu korony na zdjęciu wywołaną odbiciem promieni od dna lasu. Wielkość i charakter tego odbicia mogą być różne w zależności od składu gatunkowego i gęstości podrostu, podszytu i runa leśnego.

Odpowiedzi na stawiane tu pytania zostały udzielone w wyniku badań przeprowadzanych w 1977 roku na terenie Nadleśnictwa Kozienice, w drzewostanach znajdujących się jeszcze wówczas w strefie wolnej od uszkodzeń przemysłowych. To ostatnie jest ważne zwłaszcza dlatego, że dostrzegane wówczas zmienności różnych parametrów drzew można było przypisywać głównie zmienności osobniczej.

Na podstawie 276 drzew próbnych stwierdziłem wówczas [5], że wysokość drzewa, długość korony, jak również stosunek tych dwóch wielkości, jeżeli nawet uczestniczą w procesie tworzenia się zmienności barwy na zdjęciu spektrostrefowym, to czynią to w znikomym zaledwie stopniu (około 2% ogólnej zmienności wskaźnika barwy). Wybór drzew próbnych był dokonany z myślą o przeprowadzeniu badań w możliwie dużym zakresie zmienności wskaźnika barwy. Badania były prowadzone dla wskaźnika barwy w przedziale od $b = 0,20$ do $b = 1,00$, co stanowi 80% całego zakresu zmienności tego wskaźnika. Uzyskany w cytowanych tu badaniach około dwu procentowy wpływ zmienności budowy geome-

trycznej drzewa na zmienność wskaźnika barwy, po skonfrontowaniu z szerokością wykorzystywanego przedziału zmienności wskaźnika (80%) pozwala twierdzić, że błąd wskaźnika barwy wywołany tylko zmiennością osobniczą budowy korony sosny nie będzie większy od $m_b = \pm 0,02$. Wielkość ta jest poniżej lub też na granicy możliwości postrzegania różnicowania barw na zdjęciu spektrostrefowym. Na podstawie późniejszych badań dodam, że to twierdzenie jest słuszne w odniesieniu do drzewo-stanu głównego, a ściślej do drzew panujących i współpanujących.

Drugą ważną kwestią jest udział igliwia znajdującego się w dolnej części korony w tworzeniu się różnicowania barw na zdjęciu spektrostrefowym. Chodzi głównie o to, czy naturalna obecność martwych igieł w dolnej części korony nie wpłynie na obraz korony błędnie sugerując w ten sposób pogorszenie się stanu aparatu asymilacyjnego w górnej i środkowej części korony.

Ustosunkowanie się do tej kwestii zostało dokonane w wyniku wspomnianych już badań na terenie nadleśnictwa Kozienice [5]. Jako miarę charakterystyki aparatu asymilacyjnego przyjąłem wskaźnik ubytku igieł na pędach, który był określany na podstawie szczegółowych analiz dokonanych w terenie, po ścięciu 96 drzew próbnych. Ubytek igieł na pędach był badany osobno dla górnej, środkowej i dolnej części korony. Przedmiotem oceny w terenie była, między innymi, obecność igieł na przyrostach trzech kolejnych roczników. Jeżeli w terenie stwierdzono, jako przeciętny stan faktyczny np. pełen garnitur igieł na przyroście tegorocznym (1977 r. — 100%), 80% igieł na przyrostach rocznika 1976 r. oraz obecność 30% igliwia na przyrostach rocznika 1975 r., to przy założeniu stanu „idealnego” (np. trzy kolejne roczniki mają pełen garnitur igieł), wskaźnik ubytku igieł (i) był liczony jako

$$i = \frac{100 + 80 + 30}{300} = 0,70$$

Tak obliczony wskaźnik ma komunikatywny wyraz słowny. Można bowiem powiedzieć, że wskaźnik np. $i = 0,70$ oznacza, iż badane drzewo zachowało przeciętnie 70% igliwia w stosunku do drzewa, które nie utraciło igieł w trzech kolejnych latach.

Jak widać, wskaźnik ubytku igieł jest pojęciowo zbliżony do wskaźnika liczby roczników igieł. Jednak operowanie liczbą roczników igieł (powszechnie w leśnictwie) w tym przypadku wydawało się mało precyzyjne.

Wskaźniki ubytku igieł były określone dla wszystkich 96 drzew próbnych osobno dla górnej (i_g), środkowej (i_s) oraz dolnej części korony (i_d). W tablicy 1 prezentuję wyniki badania mocy korelacji wskaźnika barwy

(b) ze wskaźnikami ubytku igieł, osobno dla każdej z trzech wymienionych części korony:

Tablica 1

Korelowane zmienne	Liczebność korelowanych par zmiennych	Współczynnik korelacji liniowej
$b \rightarrow i_g$	96	0,40
$b \rightarrow i_s$	96	0,44
$b \rightarrow i_d$	96	0,03

Oczywistym wnioskiem wynikającym z tablicy 1 jest stwierdzenie braku zależności między zmiennością wskaźnika barwy a ilością igliwia w dolnej części korony. To stwierdzenie nie jest zaskoczeniem nawet przy intuicyjnym sposobie argumentowania. W tym jednak przypadku znaczenie badanego zjawiska jest tak duże, że przeprowadzenie dowodu braku wpływu dolnej części korony na barwę zdjęcia należało — moim zdaniem — traktować jako konieczność.

Wyniki obliczeń przedstawione w tablicy 1 mogą być traktowane jako udokumentowany argument pozwalający wyłączyć z dalszych rozważań nie tylko wpływ zjawiska samooczyszczania się drzewa z gałęzi, ale może być także argumentem o znaczeniu bardziej ogólnym. Skoro bowiem górna i środkowa część korony stanowią wystarczająco szczelny ekran dla promieni odbitych od dolnej części korony, to tym bardziej będzie on nieprzenikniony dla promieni odbitych od czegokolwiek, co znajduje się pod całą koroną. W tym kontekście traci znaczenie obawa o zniekształcenie barwy obrazu korony przez promienie odbite od dna lasu.

Dotychczas zrelacjonowana dyskusja na temat niepożądanych przyczyn zróżnicowania barw na zdjęciu spektrostrefowym, a ściślej biorąc udokumentowane — jak się wydaje — argumenty oddalające obawy o istnienie tych przyczyn, torują drogę ku wykorzystywaniu zdjęć spektrostrefowych do badania stanu przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych.

3. Fotointerpretacyjna metoda określania stref przemysłowych zagrożenia drzewostanów sosnowych

3.1. Związek między treścią spektrostrefowych zdjęć lotniczych i przyrodniczymi kryteriami oceny stopnia przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych

Używane w polskim leśnictwie pojęcie stopnia zagrożenia drzewostanów będących pod wpływem przemysłowych zanieczyszczeń powietrza

jest ściśle związane z nasileniem widocznych symptomów uszkodzeń aparatu asymilacyjnego w górnej i środkowej części korony. Ocena stopnia nasilenia tych symptomów jest następnie wykorzystywana do określenia stopnia zagrożenia drzewostanu. Miara tego jest liczbowy wskaźnik zagrożenia W .

W badaniach drzewostanów sosnowych będących pod wpływem SO_2 wyróżnia się, jak wiadomo, 5 grup zewnętrznych objawów uszkodzeń aparatu asymilacyjnego, a w każdej z nich cztery stopnie nasilenia. Rozmiar uszkodzeń aparatu asymilacyjnego jest wyrażany liczbą, w postaci wskaźnika zagrożenia, który jest obliczany jako średnia arytmetyczna liczb określających stopień nasilenia poszczególnych symptomów.

Ogólnie rzecz biorąc wskaźnik zagrożenia W jest funkcją liniową pięciu zmiennych, którą można zapisać w postaci:

$$W = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 \quad (3)$$

gdzie X_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) określa liczby stopnia nasilenia i -tego symptomu uszkodzeń aparatu asymilacyjnego.

Punktem wyjścia do dalszych rozważań jest fakt, iż formalnie i faktycznie uznanymi symptomami przemysłowych uszkodzeń drzewostanów są:

- 1) zmiany długości i kształtu igliwia, których nasilenie w czterostopniowej skali od 0 do 3 oznaczam symbolem X_1 ,
- 2) zmiany w barwie igliwia (X_2),
- 3) zmiany liczby roczników igieł na pędach (X_3),
- 4) zmiany w przyroście wysokości (X_4),
- 5) zmiany żywotności drzewa (X_5).

Podstawą do wyrobienia sobie opinii o wpływie zmienności tych symptomów na zróżnicowanie barwy obrazu koron na zdjęciu spektrostrefowym są rozpoznawcze powierzchnie próbne w liczbie 8 założone w 1978 roku w drzewostanach Nadleśnictwa Konin, znajdujących się pod wpływem SO_2 emitowanego przez elektrownie Pątnów i Konin. W obrębie każdej z tych powierzchni określono — zgodnie z obowiązującymi zasadami (Zarządzenie nr 143 MLiPD z 1970 r.) — stopnie nasilenia wymienionych pięciu zewnętrznych objawów uszkodzeń oraz wielkości wskaźnika zagrożenia, który dla zaznaczenia, iż został wyznaczony na podstawie badań terenowych oznaczam symbolem W_t . Prace terenowe zostały wykonane przez pracowników krakowskiego oddziału Biura Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej.

W tablicy 2 przedstawiam dane o drzewostanach, w których wybrano wspomniane powierzchnie próbne. Dodam, że wymienione w tej tablicy drzewostany znajdują się na siedlisku boru mieszanego świeżego.

Tablica 2

Nr pow.	Wiek w latach	Bonitacja siedliska	Czynnik zadrzewienia	Liczba drzew	Wskaźnik zagrożenia W_t
1	47	Ia	0,84	13	0,88
2	62	II	0,51	13	1,42
3	82	II	0,75	13	0,97
4	85	II/III	0,81	13	1,29
5	89	I/III	0,85	13	0,74
6	93	I/II	0,62	12	0,88
7	96	III	0,96	13	0,60
8	106	II/III	0,93	13	0,75
				103	

Położenie drzew próbnych w lesie określono pomiarem geodezyjnym. Współrzędne terenowe drzew zostały następnie przetransformowane na układ współrzędnych tłowych spektrostrefowych zdjęć lotniczych i posłużyły do zidentyfikowania tych drzew w przestrzeni modelu stereoskopowego. Dzięki temu obrazom koron drzew próbnych można było przyporządkować odpowiadające im wskaźniki barwy (b).

W tablicy 3 prezentuję wyniki badania korelacji między wskaźnikiem barwy (b) a stopniami nasilenia poszczególnych symptomów przemysłowych uszkodzeń aparatu asymilacyjnego:

Tablica 3

Zmienna korelowana ze wskaźnikiem barwy	Liczebność próby (n)	Współczynnik korelacji liniowej (r)
X_1	103	-0,43
X_2	103	-0,27
X_3	103	-0,44
X_4	103	-0,50
X_5	103	-0,66

We wszystkich przypadkach współczynniki korelacji (r) są znaczące na poziomie istotności 0,05.

Wyniki przedstawione w tablicy 3 nasuwają szereg spostrzeżeń, a mianowicie:

Stosunkowo mała moc korelacji wskaźnika barwy ze zmianą barwy igliwia (X_2 ; $r_2 = -0,27$) nie jest specjalnym zaskoczeniem. Notowane

zmiany tego symptomu uszkodzenia aparatu asymilacyjnego zawierają się w przedziale od igliwia zielonego ze sporadycznie na żółto zabarwionymi końcami (stopień nasilenia 0) do igliwia bladozielonego z plamkami czerwonymi, czerwono-brunatnymi lub nawet szarymi (stopień nasilenia 3). Tak w gruncie rzeczy subtelna zmiana odcienia zieleni igliwia ma niewielką szansę na odwzorowanie się na filmie spektrostrefowym. Dokonuje się ona bowiem w zasadzie wewnątrz przedziału uczulenia filmu na ten zakres promieniowania.

Jeżeli mimo tego istnieje wprawdzie słaba, lecz nie przypadkowa zależność między zmianą zabarwienia igliwia a zabarwieniem obrazu korony na zdjęciu, to można ją tłumaczyć tylko narastającą liczbowo obecnością w koronie igliwia przebarwionego. Sądzę zatem, że patrząc z punktu widzenia fotografii spektrostrefowej, charakter wpływu zmiany zabarwienia igliwia (X_2) jest zbliżony do genezy wpływu czynnika X_5 tj. wpływu zmiany żywotności drzewa.

Zaskoczeniem jest licząca się moc korelacji zmian w przyroście wysokości (X_4 ; $r_4 = -0,50$). Zmiany w przyroście wysokości są wyrażane głównie zniekształceniem pokroju korony, a przecież wcześniejsze badania wykazały brak związku między zmiennością barwy zdjęcia a budową korony [5]. Przypomnę, że wpływ parametrów budowy korony określiłem wówczas jako znikomy, kształtujący barwę na zdjęciu w około 2÷5% jej zmienności. Pojawiła się zatem nowa kwestia, która wymaga ustosunkowania się do niej, co niebawem uczynię.

Komentując wyniki przeprowadzonych badań (tabl. 3) pragnę zwrócić uwagę na zgodność znaków współczynników korelacji. Występujący tu zawsze znak minus oznacza, że wzrostowi stopnia nasilenia każdego z symptomów uszkodzeń aparatu asymilacyjnego towarzyszy zmniejszanie się wielkości wskaźnika barwy. Jest to zatem kolejne, empiryczne potwierdzenie słuszności przyjętej definicji wskaźnika barwy jako miary stanu aparatu asymilacyjnego sosny. Zgodność znaków współczynników korelacji zawiera w sobie także sugestię, iż w procesie kształtowania się barwy obrazu korony sosny na zdjęciu spektrostrefowym mogą uczestniczyć wszystkie rozpatrywane symptomy przemysłowych uszkodzeń drzewostanów i to synergicznie a nie neutralizująco.

Materiał doświadczalny uzyskany ze 103 drzew próbnych pobranych z 8 różnych drzewostanów Nadleśnictwa Konin umożliwił zestawienie układu 103 równań typu:

$$a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 - b = 0 \quad (4)$$

gdzie niewiadomymi były współczynniki w liczbie sześciu, od a_0 do a_5 . Wielkości $X_1, X_2, \dots, X_5$ były dane z terenowych badań drzew próbnych,

natomiast rolę wolnych wyrazów pełniły wskaźniki barwy (b) określone na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych.

Po rozwiązaniu układu równań typu (4) metodą najmniejszych kwadratów otrzymałem równanie, które jest matematycznym modelem opisującym skutek w postaci wskaźnika barwy wywołany przyczynami w postaci zewnętrznych objawów przemysłowego uszkodzenia aparatu asymilacyjnego. Model ten można uważać za opisujący drzewostany reprezentowane powierzchniami rozpoznawczymi opisanymi w tablicy 2.

Równanie modelu, o którym mowa, ma postać:

$$\hat{b} = 0,71 - 0,0223 X_1 - 0,0228 X_2 - 0,0228 X_3 - 0,00668 X_4 - 0,0501 X_5 \quad (5)$$

To równanie, jako określone z układu nadwyznaczonego (6 niewiadomych ze 103 równań) przedstawia sobą zależność korelacyjną. Współczynnik korelacji wielorakiej (wielokrotnej) wynosi:

$$R = 0,71 \quad (6)$$

i jest — jak to stwierdziłem — nieprzypadkowo różny od zera na poziomie istotności 0,05.

Średni błąd wielkości modelowanej $\hat{b}$, określony na podstawie odchylek $v = b - \hat{b}$ wyraża się wielkością

$$m_{\hat{b}} = \pm 0,05 \quad (7)$$

czyli 5% całego przedziału zmienności wskaźnika barwy.

Uzyskaną wielkość błędu (7) nie sposób pozostawić bez komentarza. Informuje ona bowiem o tym, że modelując wskaźnik barwy zmianami parametrów charakterystyki uszkodzeń aparatu asymilacyjnego, otrzymuje się wielkość tego wskaźnika obarczoną błędem nie większym od błędu określenia wskaźnika barwy na podstawie zdjęć. Oznacza to, że wnioskowanie na podstawie wskaźników barwy czy to modelowanych czy obserwowanych jest równoznaczne.

Wpływ poszczególnych symptomów przemysłowych uszkodzeń ($X_1, X_2, \dots, X_5$) jest dobrze widoczny zwłaszcza wtedy, gdy określi się procentowy udział każdego z nich w ogólnej zmienności wskaźnika barwy, przy założeniu jednakowego (lecz różnego od zera) stopnia nasilenia każdego z symptomów. Przekształcając w myśl tego równanie (5) otrzymuje się wyniki przedstawione w tablicy 4.

W pierwszej kolejności pragnę zwrócić uwagę na udział zmian przyrostu wysokości drzewa (X_4) na zmienność wskaźnika barwy. Wielkość tego udziału jest znikoma i zawiera się w granicach błędu zarówno określenia, jak i matematycznego modelowania wskaźnika barwy (7). Traci

Tablica 4

Symbol symptomu uszkodzenia aparatu asymilacyjnego	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Razem
Procentowy udział nasilenia symptomu uszkodzenia w ogólnej zmienności wskaźnika barwy	18%	17%	19%	5%	41%	100%

wobec tego znaczenie kwestia, która została wywołana zaskakująco dużą mocą korelacji zmian przyrostu wysokości drzewa ze wskaźnikiem barwy ($r = -0,50$, tabl. 3). Uważam więc, że mam prawo utrzymać w mocy słuszność wniosków na temat braku wpływu zmian budowy korony na zmienność wskaźnika barwy [5].

Najważniejszym wnioskiem wynikającym z omawianych badań jest stwierdzenie, iż dominującą przyczyną zróżnicowania barw obrazów koron sosny na zdjęciu spektrostrefowym jest zmiana żywotności drzewa (X_5 tabl. 4). Przez to pojęcie rozumie się zjawisko obumierania drzewa, od sporadycznie występujących w koronie objawów usychania pędów i gałązek bocznych jeszcze nie powodujących prześwietlenia korony aż do objawów początku obumierania drzewa dostrzeganych w postaci silnie zaawansowanego procesu usychania pędów i całych gałęzi.

To właśnie stwierdzenie wspomagane współdziałającym charakterem wpływu innych symptomów uszkodzeń jest podstawą do sformułowania koncepcji fotointerpretacyjnej metody określania stref zagrożenia drzewostanów sosnowych będących pod wpływem przemysłowych zanieczyszczeń powietrza.

3.2. Koncepcja fotointerpretacyjnej metody określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych

Opracowanie sposobu precyzyjnego określania barwy spektrostrefowych obrazów korony sosny wskaźnikiem liczbowym (b), wykluczenie wpływu zmienności osobniczej budowy korony [5] oraz wskazanie przyczyn zróżnicowania barw na zdjęciu sprawia, że sformułowanie istoty metody wykorzystywania spektrostrefowych zdjęć lotniczych do badania stopnia przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych stało się stosunkowo łatwe.

Skoro bowiem stopnie nasilenia symptomów przemysłowych uszkodzeń aparatu asymilacyjnego ($X_1, X_2, \dots, X_5$) kształtują zarówno zmienność wskaźnika barwy b (4), (5), jak i określają (z założenia) wielkość wskaźnika zagrożenia, to prostą tego konsekwencją powinno być

kształtowanie wskaźnika zagrożenia przez wskaźnik barwy. To rozumowanie upoważnia do poszukiwania relacji między tymi wskaźnikami.

Wskaźnik zagrożenia, określony w terenie na podstawie stopni nasilenia pięciu symptomów uszkodzenia aparatu asymilacyjnego (od X_1 do X_5) można zapisać w postaci ogólnej jako

$$W_t = f_1(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (8)$$

Wskaźnik barwy — jak już wiadomo — może być przedstawiony ogólnie w postaci

$$b = f_2(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (9)$$

Powinna zatem istnieć zależność, będąca fotointerpretacyjnym modelem matematycznym wskaźnika zagrożenia, a mianowicie:

$$W_f = f_3(b) \quad (10)$$

której postać funkcji f_3 będzie dobrana przy założeniu warunku

$$W_t = W_f \quad (11)$$

W praktyce warunek (11) powinien być zastąpiony innym, a mianowicie:

$$\sum (W_f - W_t)^2 = \text{minimum} \quad (12)$$

Warunek (12) otwiera możliwości operowania spostrzeżeniami nadliczbowymi, co pozwala oceniać dokładność, z jaką model (10) opisuje badane zjawisko (8).

Jeżeli funkcja f_3 zostanie tak dobrana, że będzie modelowała wskaźnik zagrożenia z dokładnością nie mniejszą od dokładności określenia takiego wskaźnika w terenie, wówczas będzie można określone na podstawie zdjęć wielkości wskaźnika W_f traktować jako równoznaczne pojęciowo z treścią przyrodniczą wskaźnika W_t .

Gdyby była znana postać równania modelu wskaźnika zagrożenia (10), to na jego podstawie można by obliczyć wskaźnik zagrożenia dla każdego drzewa, dla którego został określony wskaźnik barwy. Taki sposób postępowania, aczkolwiek rozwiązuje problem badania stopnia uszkodzenia pojedynczych drzew, to jednak pozostawia otwartą kwestię charakteryzowania stopnia zagrożenia drzewostanów i to nawet wtedy, gdyby (sprawdzając do absurdu) przebadać wszystkie drzewa tworzące drzewostan. Zawsze trzeba będzie wprowadzać jakąś stratyfikację stopnia zagrożenia, jakieś podziały terytorialne, w obrębie których będzie się zamykać syntetyczna ocena tego zjawiska.

Wylania się zatem problem przejścia od już możliwej do podania charakterystyki pojedynczych drzew do poszukiwanej charakterystyki drzewostanu.

W przypadku terenowej metody określania stref zagrożenia przyjmuje się, że miarą stopnia zagrożenia jest wskaźnik W_t określony na podstawie 10 drzew próbnych, i że jest on reprezentatywny dla około 50 hektarów drzewostanów sąsiadujących z powierzchnią próbną. Nie mam ani powodów ani podstaw do udziału w trwającej dyskusji na temat reprezentatywności próby o takiej liczebności, zwłaszcza że ta dyskusja ma — moim zdaniem — znikome szanse na zmianę swego charakteru na mniej akademicki.

Z punktu widzenia fotointerpretacji ważne jest tylko to, czy treść przyrodnicza terenowego wskaźnika zagrożenia W_t da się przedstawić wskaźnikiem fotointerpretacyjnym W_f (10). Cały dotychczasowy wywód jest poświęcony temu pytaniu i wszystko wskazuje na to, że oba te wskaźniki mogą być adekwatne w sensie jakościowym. Jednak ilościowo nie są ze sobą powiązane i to między innymi stanowi o znaczeniu metody fotointerpretacyjnej.

Już w samej istocie koncepcji metody fotointerpretacyjnej tkwi zasada rozdzielnego traktowania sposobu pobierania treści przyrodniczej z badań terenowych (8), (12), oraz sposobu przyporządkowywania pobranej treści tym wszystkim drzewom, dla których został zaobserwowany wskaźnik barwy. Tę zasadę można rozumieć i w ten sposób, że zależność merytoryczna metody fotointerpretacyjnej od terenowej nie wywołuje skutków w sposobie przenoszenia wiedzy o pojedynczych drzewach na wiedzę o drzewostanie, i że ten problem musi być samodzielnie rozwiązany przez metodę fotointerpretacyjną.

Z przeprowadzonych rozważań (podrozdział 3.1) wynika, że czynnikiem szczególnie kształtującym zróżnicowanie zabarwienia obrazów koron sosny na spektrostrefowym zdjęciu lotniczym jest parametr określany w leśnictwie jako *zmiana żywotności drzewa*, którego miarą jest stopień nasilenia procesu obumierania drzewa.

Blisko połowa ogólnej zmienności wskaźnika barwy jest powodowana nasileniem zmian żywotności drzewa (tabl. 4). Z samej istoty tworzenia się barw na zdjęciu spektrostrefowym wiadomo, że większy od zera stopień nasilenia tego symptomu wyrazi się obecnością, w części obrazu korony drzewa, barwy zielonej, typowej dla martwego igliwia. Skoro tak jest, to informacje o tym fakcie można wydobyć z treści zdjęcia także w inny sposób, nie tylko poprzez określanie wskaźnika barwy, a mianowicie:

Operując zdjęciami spektrostrefowymi w skalach 1 : 6000 do 1 : 8000 i modelem stereoskopowym w skali 1 : 1000 można zauważyć nie tylko martwe drzewa, lecz także w koronach żyjących drzew martwe igliwie w skupieniu nawet o wielkości 5÷10 cm. Oznacza to, że interpretator zdjęcia ma wgląd w taką cechę drzewostanu, która umyka uwadze obser-

watora znajdującego się wewnątrz lasu mimo, iż jest to znacząca cecha z punktu widzenia charakterystyki zdrowia drzewostanu. I o ile trudno byłoby przypisać większe znaczenie faktowi istnienia martwych pędów lub gałązek na pojedynczym drzewie, o tyle nie można odmówić przyrodniczego sensu pojawiającej się możliwości określania stopnia nasilenia tego zjawiska w odniesieniu do dużej grupy drzew współżyjących na określonej powierzchni (np. wydzielanie).

Interpretator zdjęcia bez większego trudu może określić liczbę drzew częściowo uszkodzonych (L_u) dostrzeganych w ogólnej liczbie (L) obserwowanych drzew. Procentowy wskaźnik częściowych uszkodzeń może być wówczas obliczony z wzoru:

$$u\% = \frac{L_u}{L} 100 \quad (13)$$

Z istoty tego wskaźnika wynika, że nie odnosi się on do pojedynczego drzewa (tak jak wskaźnik barwy), lecz charakteryzuje grupę drzew o określonej liczebności (L).

Z przyrodniczego punktu widzenia wskaźnik u (13) ma cechy wymiernego symptomu bardzo wczesnego stadium procesu wydzielania się posuszu. Zjawisko wydzielania się posuszu nie jest — jak wiadomo — brane pod uwagę przy wymiernym klasyfikowaniu stopnia przemysłowego zagrożenia drzewostanów mimo, iż istnienie związku między tymi zjawiskami jest bezspornym faktem [38], [39]. Łatwo jest zrozumieć absencję tego symptomu w terenowej metodzie określania stref zagrożenia. Nie można bowiem liczyć na to, aby wczesne objawy narastania procesu wydzielania się posuszu mogły być określane wymiennie i z dostateczną dokładnością na podstawie terenowych oględzin koron drzew na pniu. Rozmiary wydzielania się drzew z drzewostanu są możliwe do określenia w terenie dopiero po fakcie, co przekreśla użyteczność tego symptomu.

Inna jest sytuacja w przypadku operowania wskaźnikiem częściowych uszkodzeń (u). Przez pojęcie zliczanych drzew częściowo uszkodzonych rozumie się jedynie takie, których uszkodzenie aparatu asymilacyjnego jest jeszcze na tyle małe, tak mało widoczne z ziemi, że nie wpłynie na decyzję o usunięciu takich drzew w ramach cięć sanitarnych. Ponadto, obserwując model stereoskopowy lasu utworzony ze zdjęć spektrostrefovych można wyłączyć z rozważań drzewa przygłuszone, a zwłaszcza opanowane, ograniczając w ten sposób do minimum wpływ naturalnego przebiegu procesu wydzielania się posuszu na wskaźnik u .

W tej sytuacji wydaje się celowe wzbogacenie przedstawionej koncepcji fotointerpretacyjnej metody modelowania wskaźnika zagrożenia. Jak dotąd jest ona zapisana sekwencją wzorów od (8) do (12). Teraz,

uwzględniając wskaźnik częściowych uszkodzeń, można postawić tezę o istnieniu matematycznej relacji typu

$$W_f = f_4(u) \quad (14)$$

której postać funkcji f_4 będzie dobrana tak jak poprzednio, przy zachowaniu warunku (12).

Otwartą pozostaje kwestia adekwatności obu fotointerpretacyjnych modeli wskaźnika zagrożenia zapisanych wzorami (10) i (14).

Pojęciowo oba te modele wydają się być równoznaczne z tym jednak, że model (14) jest bardziej uzasadniony technologicznie ze względu na łatwość określania wskaźnika częściowych uszkodzeń. Jednak najważniejszą cechą modelu (14) jest to, że odnosi się on wprost do drzewostanu, bez pośrednictwa charakterystyk otrzymywanych w wyniku badania zaledwie pewnej liczby drzew próbnych.

Syntetyczny charakter wskaźnika częściowych uszkodzeń, a więc i modelu (14), może — w niektórych przypadkach — być przyczyną nie uzasadnionej, nadmiernej generalizacji powierzchniowego rozkładu przemysłowego zagrożenia lasu. Sądzę, że może to wystąpić w miejscach znacznego zróżnicowania bonitacji siedliska lub też tam, gdzie oprócz wpływu przemysłowych zanieczyszczeń powietrza wkroczył inny energicznie działający, destruktywny czynnik (np. cetyńce w pobliżu składowiska drewna). Wtedy bardziej celowe wydaje się być łączne wykorzystywanie obu fotointerpretacyjnych wskaźników, a więc operowanie modelem matematycznym typu

$$W_f = f_5(b, u) \quad (15)$$

Postać funkcji f_5 , podobnie jak poprzednio, należy określać z zachowaniem warunku (12).

Ogólne postaci równań matematycznych modeli fotointerpretacyjnego wskaźnika zagrożenia, tj. równań (10), (14) i (15), formalnie rzecz biorąc rozwiązują rozważany w tej pracy problem możliwości wykorzystania spektrostrefowych zdjęć lotniczych przy badaniu przemysłowego zagrożenia drzewostanów. Pojawienie się takich możliwości skłania do zbadania użyteczności proponowanego rozwiązania.

Przyznaję, że nie mam podstaw do twierdzenia, że istnieją takie postaci równań modeli, które byłyby słuszne dla wszystkich drzewostanów sosnowych w Polsce. Innymi słowy, nie można twierdzić, że istnieje jeden, uniwersalny model wskaźnika zagrożenia.

Brak jest jednak również podstaw do obaw, iż zasady budowania matematycznego modelu zmienności zagrożenia drzewostanów sprawdzone w określonych warunkach zawiodą w trakcie badania innych drzewostanów, znajdujących się w innych warunkach. Twierdzę tak dlatego, że

cały dotychczasowy wywód budujący koncepcję metody nie zawierał postanowień szczególnych w postaci znaczących ograniczeń lub uwarunkowań. Zasady prezentowanej metody są konsekwencją następstwa zdarzeń, których źródłem są: od strony fotointerpretacyjnej szczególne cechy spektrostrefowych zdjęć lotniczych lasu i im podporządkowane, specjalne sposoby interpretacji, a od strony przyrodniczej ogólny mechanizm deprecjacji lasu wywołany przemysłową działalnością człowieka.

Z tego też względu prezentowane w następnym rozdziale wyniki zastosowania metody na konkretnym obiekcie mogą być traktowane jako miarodajna ocena jej merytorycznych cech, które nie powinny ulegać zmianom w trakcie stosowania metody na innych obiektach.

4. Przykład zastosowania fotointerpretacyjnej metody określania stref zagrożenia drzewostanów sosnowych będących pod wpływem przemysłowych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego

Poligonem doświadczalnym dla sprawdzenia koncepcji metody, dyskusji jej zalet i braków oraz wprowadzenia uściśleń były drzewostany sosnowe Nadleśnictwa Konin znajdującej się pod wpływem emisji z elektrowni Pątnów i Konin oraz częściowo także z Huty Aluminium w Małńcu k/Konina. Ten poligon wydaje się być typowy dla coraz to większych w Polsce obszarów leśnych nękanych długoletnim wpływem stosunkowo małych stężeń SO_2 .

Niezbędne rozeznanie terenowe stopnia zagrożenia drzewostanów uzyskano na podstawie 14 rozpoznawczych powierzchni próbnych w drzewostanach sosnowych od III do VI klasy wieku, na przeważającym tam siedlisku boru mieszanego świeżego, w przedziale od I do III klasy bonitacji siedliska. Powierzchnie były tak wybrane w terenie, aby reprezentowały sobą drzewostany w całym zakresie występujących tam uszkodzeń. W tym przypadku są to drzewostany znajdujące się w strefie wolnej od uszkodzeń oraz w I i II strefie zagrożenia ($0,42 \leq W_t \leq 1,86$). Rozproszenie powierzchni rozpoznawczych jest celowo duże (największa odległość między powierzchniami wynosi 26 km). Ma ono za zadanie uwzględnienie wpływu lokalnych warunków bytowania lasu, co ma stanowić tytuł do traktowania wniosków wynikających z przeprowadzonych badań jako słusznych dla całego obszaru objętego powierzchniami próbnymi.

Wyjściowym materiałem fotointerpretacyjnym były spektrostrefowe zdjęcia lotnicze w skali ok. 1 : 7000 wykonane z pokryciem podłużnym, co umożliwiło stereoskopową obserwację przestrzennego modelu lasu.

W tablicy 5 przedstawiam wyniki interpretacji zdjęć dane w postaci wskaźnika barwy b (rubr. 2) oraz wskaźnika częściowych uszkodzeń u (rubr. 3) charakteryzujących te drzewostany, w których były założone

terenowe rozpoznawcze powierzchnie próbne, i dla których został określony wskaźnik zagrożenia W_t (rubr. 4). Każdy ze wskaźników barwy w tablicy 5 jest średnią arytmetyczną ze wskaźników barwy 50 drzew pobranych losowo z modelu stereoskopowego drzewostanu w bezpośredniej bliskości terenowej powierzchni próbnej. Wskaźniki częściowych uszkodzeń określano na podstawie prób o liczebnościach L o ok. 400 do ok. 600 drzew pobieranych losowo z tych samych wydzieleń, w obrębie których znajdowały się terenowe powierzchnie próbne.

Tablica 5

Nr pow.	b	u	W_t	Model 1	Model 2	Model 3
				$v_1 = W_f - W_t$	$v_2 = W_f - W_t$	$v_3 = W_f - W_t$
1	2	3	4	5	6	7
18	0,72	2,0	0,42	-0,23	+0,05	+0,13
106	0,68	3,4	0,60	-0,16	-0,02	+0,03
61	0,60	5,6	0,61	+0,34	+0,16	+0,13
117	0,60	4,9	0,74	+0,21	0,00	-0,04
125	0,60	5,8	0,75	+0,20	+0,03	0,00
150	0,62	5,5	0,75	+0,07	0,00	-0,01
53	0,60	8,6	0,75	+0,20	+0,16	+0,15
146	0,62	5,3	0,88	-0,06	-0,14	-0,15
120	0,59	6,9	0,88	+0,14	-0,03	-0,07
10	0,61	8,6	0,97	-0,08	-0,07	-0,07
172	0,56	13,7	1,18	+0,02	+0,01	-0,02
92	0,58	12,0	1,29	-0,21	-0,20	-0,22
160	0,55	18,5	1,42	-0,15	0,00	-0,01
254	0,51	28,2	1,86	-0,34	+0,04	+0,06
$m_w =$				$\pm 0,21$	$\pm 0,11$	$\pm 0,11$

Formułując fotointerpretacyjną metodę określania stref zagrożenia drzewostanów (rozdział 3) sugerowałem trzy typy modeli matematycznych (10), (14), (15), za pomocą których można określać wskaźnik zagrożenia na podstawie fotointerpretacyjnych cech rozpoznawczych (wskaźniki b oraz u). Nie rozstrzygałem wówczas, który z tych modeli powinien być stosowany. Wyraziłem jedynie pogląd, że na szczególną uwagę zasługuje model nr 2 (14) budowany za pomocą wskaźnika częściowych uszkodzeń, zwłaszcza ze względu na skuteczne rozwiązanie problemu syntetycznego charakteryzowania w ten sposób drzewostanów bez pośrednictwa charakterystyk otrzymywanych w wyniku badania pojedynczych drzew próbnych.

Prezentując przykład zastosowania metody na obiekcie „Konin” prag-

nę zwrócić uwagę nie tyle na sam obiekt, na rozmiary i rozkład uszkodzeń drzewostanów, lecz głównie na kwestie metodyczne. Innymi słowy prezentowany przykład traktuję jako konieczną, empiryczną weryfikację zasad metody fotointerpretacyjnej wykonaną w typowych warunkach, na bogatym materiale doświadczalnym. Dlatego też omawiając zastosowanie metody na obiekcie „Konin” postaram się przedyskutować skuteczność rozwiązań uzyskiwanych na podstawie każdego z wymienionych modeli.

Poszukiwanie postaci funkcji modelu (*dostosowanie*) wymaga rozstrzygnięcia dwóch kwestii, a mianowicie:

— sprecyzowania a priori typu relacji matematycznej, jaka powinna opisywać modelowane zjawisko;

— określenia a posteriori parametrów równania modelu.

W tym przypadku nie istnieją przesłanki sugerujące inną od liniowej relacji matematycznej opisującej zjawisko zmienności wskaźnika zagrożenia w funkcji fotointerpretacyjnych charakterystyk lasu. Wobec tego relacje dla poszczególnych modeli powinny opisywać równania typu:

$$\text{Model nr 1} \quad W_f = A_0 + A_1 b \quad (16)$$

gdzie b jest wskaźnikiem barwy

$$\text{Model nr 2} \quad W_f = B_0 + B_1 b + B_2 u \quad (17)$$

gdzie u jest wskaźnikiem częściowych uszkodzeń

$$\text{Model nr 3} \quad W_f = C_0 + C_1 u \quad (18)$$

Określenie parametrów równań (16), (17), (18), wobec znajomości danych zawartych w tablicy 5, może nastąpić w wyniku rozwiązania, dla każdego modelu, układu n równań z k niewiadomymi, gdzie n jest liczbą rozpoznawczych powierzchni próbnych, a więc i liczbą wielkości W_t pełniących rolę wolnych wyrazów, natomiast k jest liczbą współczynników równań (liczbą niewiadomych) różną w zależności od typu modelu.

W tym przypadku parametry modelu nr 1 (A_0 i A_1) mogą być określone z układu $n = 14$ równań typu:

$$A_0 + A_1 b_i - (W_t)_i = (v_1)_i; \text{ dla } i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

Podobnie można zapisać typy równań, których układy dostarczają wielkości współczynników modeli nr 2 i nr 3:

$$B_0 + B_1 b_i + B_2 u_i - (W_t)_i = (v_2)_i \quad (20)$$

$$C_0 + C_1 u_i - (W_t)_i = (v_3)_i \quad (21)$$

Po zestawieniu układów równań osobno typu (19), (20) i (21) i po ich rozwiązaniu metodą najmniejszych kwadratów — tj. z zachowaniem warunku (12) — otrzymuje się następujące równania modeli wskaźnika za-

grożenia drzewostanów sosnowych w Nadleśnictwie Konin oraz odpowiadające im współczynniki korelacji:

$$\text{Model nr 1} \quad W_f = -6,33 b + 4,75; \quad r = -0,85 \quad (22)$$

$$\text{Model nr 2} \quad W_f = -1,23 b + 0,0451 u + 1,26; \quad R = 0,97 \quad (23)$$

$$\text{Model nr 3} \quad W_f = 0,052 u + 0,45; \quad r = 0,96 \quad (24)$$

Współczynniki korelacji są miarą skorelowania modelujących i modelowanych zmiennych tylko wtedy, gdy ich wielkościom można dać wiary na określonym poziomie istotności. Jest to uzależnione zwłaszcza od liczebności próby, na podstawie której współczynnik był estymowany. W tym przypadku dla każdego modelu liczebność próby wynosi $n = 14$. Nie są to więc próby liczebnie duże, co zobowiązuje do przeprowadzenia badania istotności współczynników korelacji testem akceptującym małe liczebności. Po przeprowadzeniu takiego testu stwierdzam, że współczynniki korelacji podane we wzorach (22), (23) i (24) są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$ co oznacza, że hipotezę o braku korelacji należy odrzucić na korzyść hipotezy alternatywnej o istnieniu związku korelacyjnego.

W kolumnach 5, 6 i 7 tablicy 5 są zestawione wielkości odchyłek po dostosowaniu wykonanym kolejno równaniami (22), (23) i (24). W ostatnim wierszu każdej z tych kolumn przedstawiam wielkości średnich błędów po dostosowaniu (m_w). Wielkości te informują głównie o tym, jak dużych przeciętnie odchyłek od wielkości terenowych W_t należy się spodziewać, wyznaczając dla dowolnego fragmentu drzewostanu wskaźnik zagrożenia metodą fotointerpretacyjną (W_f).

Zarówno wielkości średnich błędów jak i wielkości współczynników korelacji sugerują, że model nr 1, zbudowany tylko przy użyciu wskaźnika barwy opisuje zjawisko zmienności wskaźnika zagrożenia gorzej od dwóch pozostałych modeli. Z tego względu większą uwagę powinny skupiać: model nr 2 zbudowany na podstawie wskaźnika barwy i wskaźnika częściowych uszkodzeń (17), (23), oraz model nr 3, (18), (24), w którym wykorzystałem tylko wskaźnik częściowych uszkodzeń.

Jedną z miar użyteczności matematycznego modelu badanego zjawiska jest wielkość średniego błędu po dostosowaniu (m_w). Oprócz tego, że na podstawie wielkości tego błędu można oszacować prawdopodobne odchylenie wielkości modelowanej od znanej z innych źródeł, to można również się zorientować o ile modelowane wielkości oddają treść zawartą we wzorcach modelu.

W tym przypadku wzorcami modelu są wskaźniki zagrożenia (W_t) określone na podstawie badań terenowych. Wskaźnik zagrożenia (W_t) jest obciążony pewnym błędem, jak to jest zawsze, gdy ma się do czynienia z wielkością będącą wynikiem pomiaru lub oszacowania. Z dostępnej mi literatury nie wynika, aby były prowadzone szczegółowe badania do-

kładności określania terenowego wskaźnika zagrożenia np. przez porównanie wyników otrzymywanych niezależnie przez różnych obserwatorów na tym samym materiale. Jednak wychodząc z definicji wskaźnika zagrożenia można przyjąć, że wprawny i staranny taksator jest w stanie określić wskaźnik zagrożenia ze średnim błędem rzędu

$$m_t = \pm 0,07 \quad (25)$$

Średni błąd (m_w) fotointerpretacyjnie modelowanego wskaźnika zagrożenia określony na podstawie odchyłek po dostosowaniu zawiera dwie składowe: pierwszą, wynikającą z błędu określenia terenowego wskaźnika zagrożenia (m_t) oraz drugą, spowodowaną błędami określenia wskaźników fotointerpretacyjnych budujących model (m_f). Istnieje zatem ogólna zależność, która może być zapisana w postaci:

$$m_w^2 = m_t^2 + m_f^2 \quad (26)$$

Oba dyskutowane modele (tj. model nr 2 i nr 3) charakteryzują się (tabl. 5) średnim błędem po dostosowaniu

$$m_w = \pm 0,11 \quad (27)$$

Przekształcając wzór (26) można określić wielkość średniego błędu wywołanego błędnością fotointerpretacyjnych wskaźników budujących modele, a mianowicie:

$$m_f = \sqrt{m_w^2 - m_t^2} \quad (28)$$

Wykorzystując wielkości (25) i (27) otrzymuje się

$$m_f = \sqrt{0,11^2 - 0,07^2} = \pm 0,08. \quad (29)$$

Z przeprowadzonej analizy wynika praktyczny wniosek, a mianowicie: wskaźnik zagrożenia określany metodą terenową (W_t) i metodą fotointerpretacyjną (W_f) jest obarczony w tym przypadku błędem o tej samej wielkości. Oznacza to, że modele nr 2 i nr 3 są zdolne aproksymować wielkości i zmienności wskaźnika zagrożenia w punktach dostosowania (a więc i w obszarze interpolacji) z taką samą dokładnością, z jaką jest to czynione bezpośrednio w terenie.

Model nr 2 jest uwarunkowany wielkościami współczynników przy zmiennych niezależnych (b oraz u), jak też wyrazem wolnym. Aczkolwiek na podstawie współczynników korelacji ($R = 0,97$, $r = 0,96$) i średniego błędu ($m_w = \pm 0,11$) można uznać oba modele za właściwie aproksymujące wielkość wskaźnika zagrożenia, to jednak nie jest jeszcze wiadomo, czy któryś ze współczynników równań regresji (23), (24), nie jest przypadkowo różny od zera. Innymi słowy chodzi o to, czy obie zmienne nie-

zależne (czyli oba parametry fotointerpretacyjne) biorą istotny udział w kształtowaniu wskaźnika zagrożenia W_f .

Analizując istotność współczynników równań (23), (24) dochodzi się do wniosku, że współczynnik przy wskaźniku barwy w równaniu (24) jest nieistotnie różny od zera na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Pozostałym współczynnikom w obu równaniach można dać wiarę na tym poziomie istotności. Oznacza to, że model nr 2 wskaźnika zagrożenia W_f drzewostanów Nadleśnictwa Konin nie jest istotnie kształtowany zmiennością wskaźnika barwy, wobec czego należy sądzić, że te drzewostany powinien wystarczająco dobrze opisywać model nr 3 kształtowany wyłącznie wskaźnikiem częściowych uszkodzeń u .

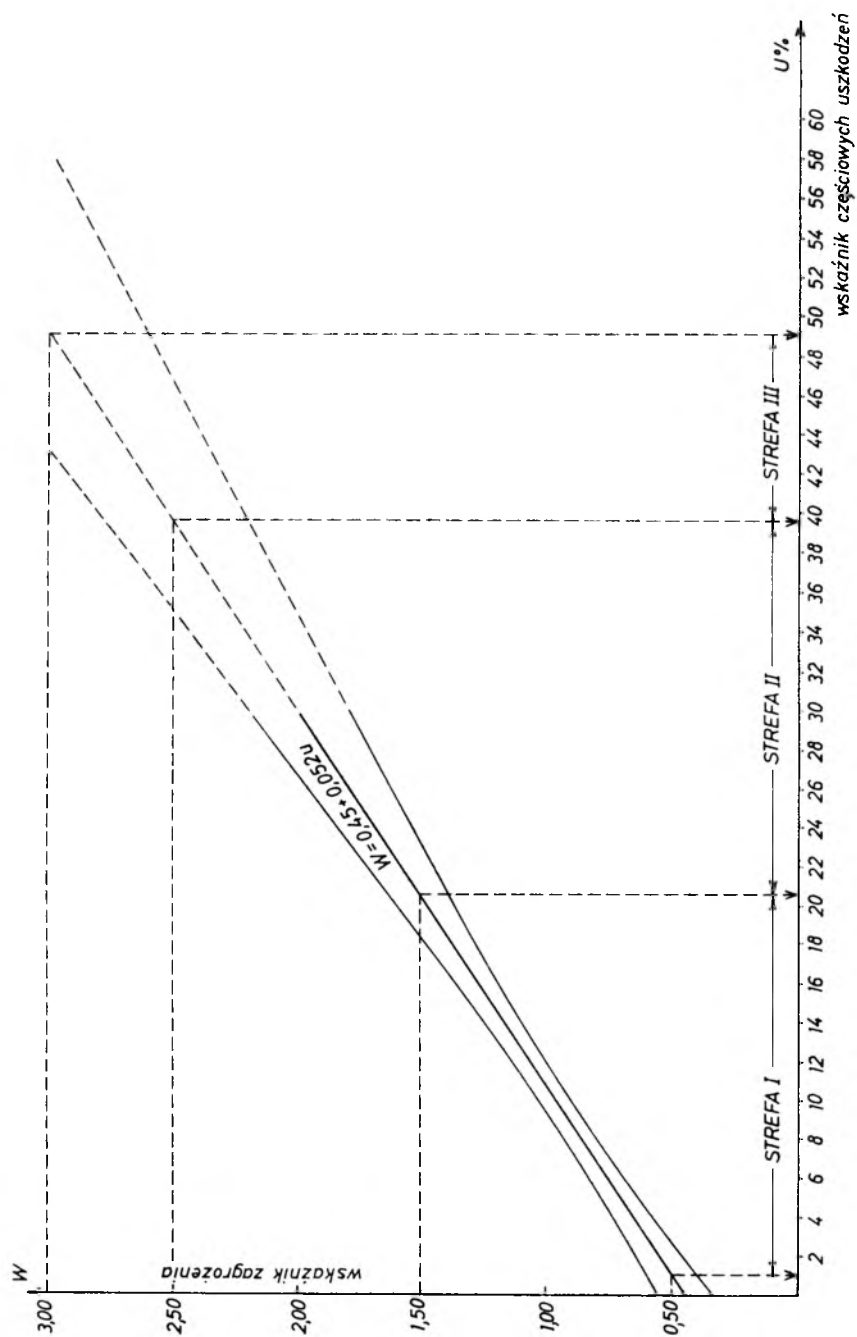
Jest to niezmiernie ważny wniosek z punktu widzenia praktyki. Chodzi bowiem głównie o to, że określanie wskaźnika częściowych uszkodzeń, w przeciwieństwie do wskaźnika barwy, nie wymaga tak wysokich kwalifikacji od obserwatora. Jest to czynność technologicznie prosta, wymagająca jedynie staranności i uwagi. Ponadto, o czym już była mowa, wskaźnik częściowych uszkodzeń wprost charakteryzuje określoną powierzchnię drzewostanu z pominięciem uśrednionych charakterystyk pojedynczych drzew, co nie jest bez znaczenia wobec ciągle dyskutowanej kwestii reprezentatywności prób.

Na rysunku 1 przedstawiam graficzną ilustrację modelu wskaźnika zagrożenia kształtowanego wskaźnikiem częściowych uszkodzeń (u) oraz przedział ufności na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Równanie (24), bądź wykres na rysunku 1, są więc ostatecznym produktem dostosowania treści przyrodniczej zawartej we wskaźnikach określonych w terenie (W_t) do treści reprezentowanej matematycznym modelem wskaźnika zagrożenia W_f . W ten sposób została uzyskana podstawa do określania wskaźnika zagrożenia dla dowolnego fragmentu drzewostanu, dla którego określi się na podstawie zdjęć wskaźnik częściowych uszkodzeń.

Trudno na podstawie cytowanego przykładu przesądzić, czy udowodniona możliwość budowania modelu wskaźnika zagrożenia tylko na podstawie wskaźnika częściowych uszkodzeń może być traktowana jako słuszna w każdym przypadku. Jak dotąd reprezentuję pogląd, że nie powinno się a priori rezygnować ze wskaźnika barwy (b). Przy obecnym poziomie praktycznej wiedzy sugeruję, aby w punktach dostosowania w każdym przypadku obserwować oba wskaźniki fotointerpretacyjne, a o wyborze typu modelu decydować dopiero po przeprowadzeniu omówionej analizy.

Opis fotointerpretacyjnej metody określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych należy uzupełnić praktycznymi uwagami na temat określania wskaźnika uszkodzeń częściowych.



Rys. 1

Dotychczas było używane dość ogólne określenie mówiące o tym, że wskaźnik częściowych uszkodzeń (u) powinien być wyznaczany dla wybranej części drzewostanu. Przez to pojęcie należy rozumieć taki fragment drzewostanu, w którym natężenie zjawiska częściowych uszkodzeń jest stałe. Z nielicznymi wyjątkami obserwując zdjęcia, nie jest się w stanie dokonać takiego podziału. Tak bywa, ale nie można na to liczyć. Dlatego też należy przyjąć jakąś zasadę, w myśl której powinny być prowadzone obserwacje tego wskaźnika.

Nie wykluczając innych sposobów proponuję następujące zasady:

1. W przypadku, gdy wskaźnik zagrożenia ma być aproksymowany modelem nr 2 tj. wówczas, gdy należy obserwować oba wskaźniki (b oraz u), wskaźnik częściowych uszkodzeń należy określać na powierzchni około 2 hektarów w otoczeniu drzew próbnych przyjętych do oznaczenia wskaźnika barwy, nie wychodząc jednak poza granicę wydzielenia, do którego należą te drzewa.

2. W przypadku operowania modelem nr 3 kształtowanym — jak wiadomo — tylko wskaźnikiem częściowych uszkodzeń, wskaźnik ten zaleca się określać w granicach przylegających do siebie pól regularnej siatki kwadratów nałożonej na stereogram. I tu również — w zasadzie — nie powinno się ignorować granicy wydzielenia. Wielkość oczka siatki kwadratów jest uzależniona od wymaganej szczegółowości badania stanu zagrożenia drzewostanów. Należy jednak pamiętać, że określony w ten sposób wskaźnik zagrożenia dotyczy drzewostanu wewnątrz oczka siatki. Nie może być ono zatem zbyt duże, gdyż gubi się wówczas możliwość stratyfikowania stopnia zagrożenia. Oczko nie może być również zbyt małe, ze względu na dokładność określania wskaźnika częściowych uszkodzeń, która jest w ścisłym związku z liczbą drzew, względem której określa się procent drzew częściowo uszkodzonych. Z dość prostych rozważań wynika, że dla uzyskania dokładności wskaźnika u rzędu około 2% wystarczy określić go na podstawie około 600 drzew. Oznacza to, że minimalna wielkość oczka siatki nie powinna być mniejsza od 1,5 do 2 ha. Jeżeli oczko siatki kwadratów przyjmie się większe, to liczebność zbioru drzew, wewnątrz którego znajduje się drzewa częściowo uszkodzone, również nie musi być większa od około 600.

W omawianym przypadku wybrano na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych 620 rozpoznawczych powierzchni na obszarze ok. 4 tys. hektarów drzewostanów sosnowych Nadleśnictwa Konin. Dla każdej z tych powierzchni określono wskaźnik barwy i wskaźnik częściowych uszkodzeń. Następnie, wykorzystując model matematyczny opisany równaniem (24) obliczono wielkości wskaźników zagrożenia W_f . Po naniesieniu tych powierzchni na mapę uzyskano kompletny materiał do wkreślenia granic stref zagrożenia.

Samo wkreślenie granic stref zagrożenia, tzn. izolinii o określonych wielkościach wskaźnika zagrożenia, nie wymaga omawiania. Warto natomiast poświęcić nieco uwagi kwestii definicji strefy zagrożenia.

Obecnie przyjmuje się, oprócz strefy wolnej od uszkodzeń, trzy strefy zagrożenia. Ten podział ma sobie przyporządkowane graniczne wielkości wskaźników zagrożenia, a mianowicie:

— strefa 0	$0,00 \leq W \leq 0,50$
— strefa II	$0,50 < W \leq 1,50$
— strefa I	$1,50 < W \leq 2,50$
— strefa III	$2,50 < W \leq 3,00$

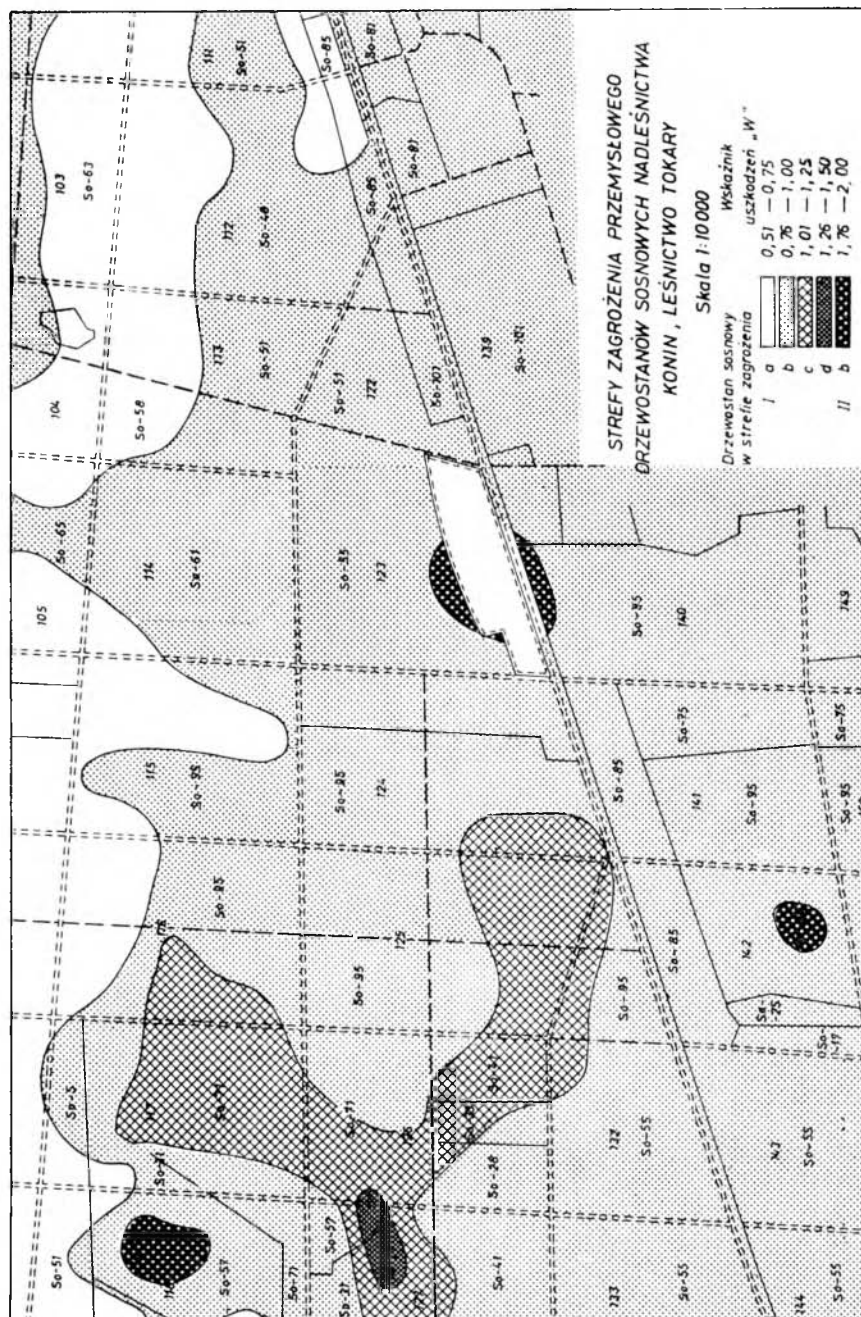
W praktyce wymienione granice wielkości wskaźnika zagrożenia służą wprawdzie do wkreślenia granic stref zagrożenia, lecz zwykle nie wprost — drogą interpolacji liniowej — ale z zaokrągleniem do granic oddziałów. Takie postępowanie można uzasadnić małą gęstością sieci rozpoznawczych powierzchni próbnych (1 powierzchnia na około 50 hektarów lasu).

Stosując metodę fotointerpretacyjną można bez większego wysiłku wielokrotnie zagęścić sieć powierzchni rozpoznawczych. Uzyskuje się w ten sposób zupełnie inny, wielokrotnie bardziej szczegółowy obraz zmienności stopnia zagrożenia drzewostanu. Skoro pojawia się taka możliwość, należy — jak się wydaje — inaczej spojrzeć na definicję stref zagrożenia.

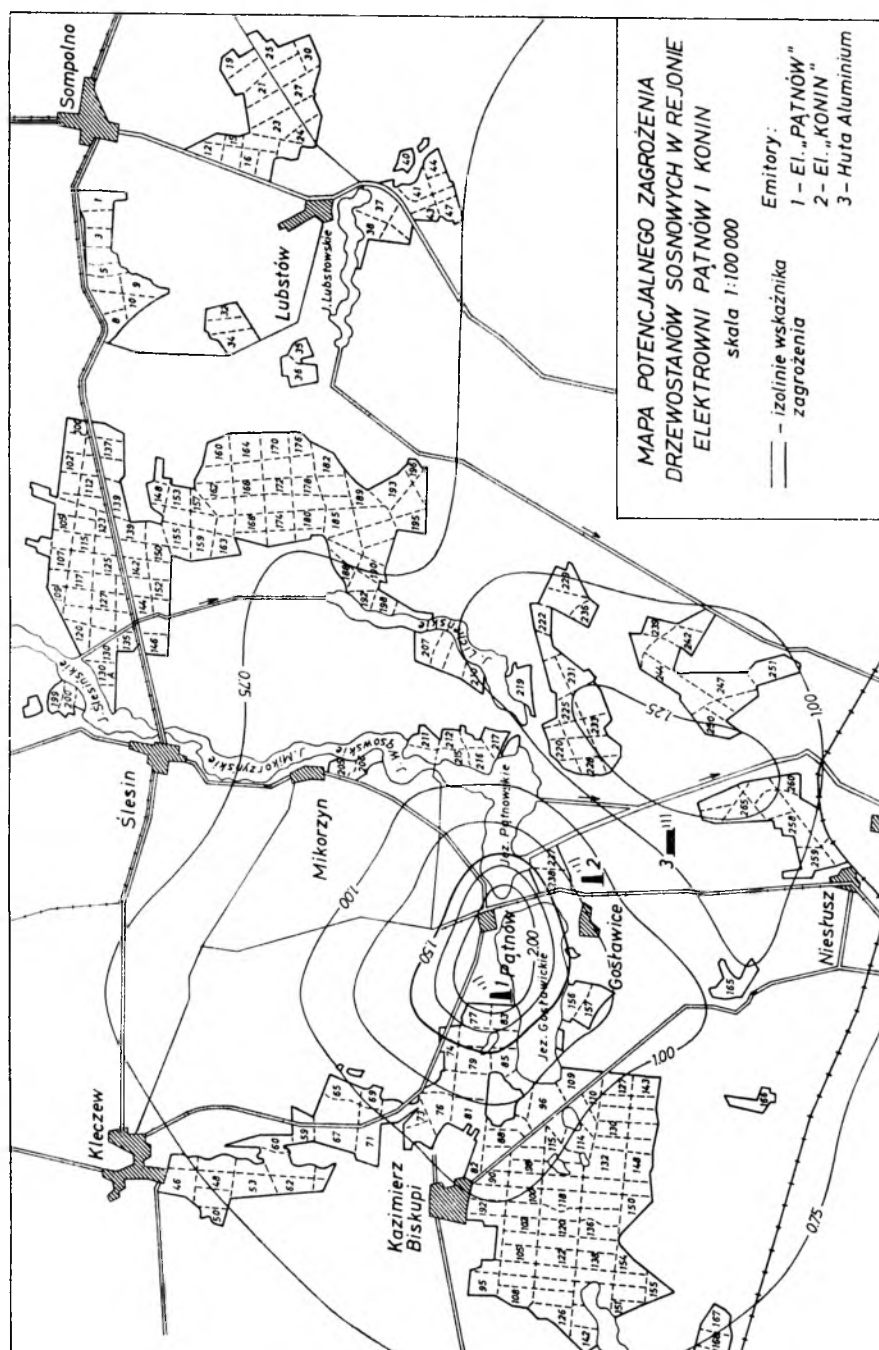
Po skonstruowaniu modelu matematycznego fotointerpretacyjnego wskaźnika zagrożenia drzewostanów Nadleśnictwa Konin (tabl. 5 oraz wzory 23 i 24) okazało się, że wielkość wskaźnika W_f może być określona z błędem średnim $m_w = \pm 0,11$ (27). Wobec tego szerokość przedziału ufności wielkości W_f na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wynosi $\pm 0,22$. Można zatem z mniej niż pięcioprocentowym ryzykiem dzielić wielkość stopnia zagrożenia na strefy o szerokości czterokrotnie mniejszej od przyjętej dla I i II strefy.

Postępując zgodnie z tym stwierdzeniem została opracowana mapa stref zagrożenia drzewostanów Nadleśnictwa Konin. Jej fragment prezentuję na rysunku 2.

Gęsta sieć punktów o znanych wielkościach wskaźnika zagrożenia umożliwia zbudowanie matematycznego modelu potencjalnego zagrożenia drzewostanów także w miejscach, gdzie nie występują obszary leśne. Na rysunku 3 prezentuję mapę potencjalnego zagrożenia w rejonie Konina. Przedstawione na mapie izolinie wskaźnika przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych są ilustracją modelu matematycznego utworzonego na podstawie 620 równań uwzględniających oprócz faktycznych uszkodzeń drzewostanów także mechanizm rozprzestrzeniania się dwu-



Rys. 2



Rys. 3

tlenku siarki z elektrowni Pątnów i Konin oraz fluoru z huty aluminium w Malińcu.

Pomijając opis budowy takiego modelu jako przekraczający ramy niniejszego opracowania pragnę zwrócić uwagę na widoczne na mapie oddzielenie wpływu huty. Nie chcę przez to powiedzieć, że prezentowana mapa określa zasięg oddziaływania poszczególnych źródeł zagrożenia drzewostanów. Jest ona jednak wyraźną ilustracją powstania — dzięki metodzie fotointerpretacyjnej — nowych możliwości syntetyzowania zjawisk oddziaływania przemysłu na środowisko (w tym przypadku na las). Sądzę także, że mapa potencjalnego zagrożenia drzewostanów sporządzona nie na podstawie przesłanek teoretycznych lecz z wykorzystaniem faktycznych skutków działalności przemysłu może mieć istotne znaczenie z punktu widzenia kształtowania krajobrazu.

W zakończeniu omówienia pierwszego na większą skalę zastosowania fotointerpretacyjnej metody określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych pragnę poruszyć kwestię opłacalności stosowania metody fotointerpretacyjnej.

Obecnie jest jeszcze za mało danych do przeprowadzenia pełnej analizy ekonomicznej. Będzie to możliwe dopiero po zebraniu bogatszych doświadczeń z innych jeszcze obiektów.

W każdym jednak przypadku ustosunkowanie się do kwestii opłacalności stosowania metody fotointerpretacyjnej wymaga wcześniejszego zrównoważenia użyteczności wyników z uzyskiwanymi metodą terenową. Zaprezentowane postępowanie badawcze i praktyczne umożliwia uzyskiwanie równoważnych wyników w sensie jakościowym tzn. w zakresie przenoszenia treści przyrodniczej z badań terenowych na fotointerpretacyjne i odwrotnie. Ponieważ metoda fotointerpretacyjna nie stawia liczących się ograniczeń co do gęstości sieci rozpoznawczych powierzchni próbnych, to powstaje odmienny, bardziej szczegółowy obraz powierzchniowego rozkładu zmienności stopnia zagrożenia drzewostanów. Tak więc, aby można było porównywać koszty obu metod trzeba albo rozpatrywać abstrakcyjną sytuację, w której będą brane pod uwagę koszty metody terenowej ponoszone przy tak dużym jak tu zagęszczeniu sieci powierzchni rozpoznawczych, albo też należy wyrobić sobie pogląd na potrzebę rozpoznania zagrożenia ze szczegółowością właściwą metodzie fotointerpretacyjnej.

Fotointerpretacyjne określanie stref zagrożenia dla obiektu „Konin” (ok. 4 tys. hektarów) kosztowało ok. 0,5 miliona złotych. Opracowanie wykonane metodą terenową kosztowałoby około 0,2 miliona złotych z tym jednak, że byłoby prawie ośmiokrotnie mniej szczegółowe. Gdyby ten sam obszar zbadać metodą terenową, lecz z przyjętą tu szczegółowością metody fotointerpretacyjnej, to koszt takiego opracowania wyniósłby ok.

1,6 miliona złotych, a więc byłby ponad trzykrotnie wyższy od kosztu zastosowania metody fotointerpretacyjnej nie licząc tego, że w takim przypadku należałoby wyciąć ponad 6 tysięcy drzew zamiast 140 potrzebnych przy metodzie fotointerpretacyjnej.

Podając te dane pragnę podkreślić relatywny charakter pojęcia opłacalności stosowania metody fotointerpretacyjnej. Z racji tej, że spektrostrefowe zdjęcia lotnicze umożliwiają zobrazowanie przemysłowego zagrożenia drzewostanów z tak bardzo dużą szczegółowością, powstaje nowy jakościowo obraz tego zjawiska. Kwestia opłacalności stosowania nowej metody staje się zatem nie tyle kwestią wielkości kwoty, co raczej przydatności i umiejętności wykorzystania tak szczegółowego obrazu stopnia zagrożenia drzewostanu.

Trudno jest mi przewidzieć w jak dużym zakresie owa szczegółowość metody fotointerpretacyjnej znajdzie zastosowanie. Myślę, że musi być dany pewien czas na przyswojenie sobie metody przez szerokie gremium leśników — zarówno naukowców, jak i praktyków — po to, aby jej możliwości mogły być należycie wykorzystane.

Przykładem nawiązującym do tego przypuszczenia jest teza o istnieniu możliwości powiązania zjawiska strat przyrostu miąższości drzewostanów sosnowych zagrożonych przez przemysł z treścią spektrostrefowych zdjęć lotniczych lasu. Została ona sformułowana przez profesora Tadeusza Trampiera z Instytutu Badawczego Leśnictwa już w 1977 roku tj. zaraz po ogłoszeniu wyników badań nad przyczynami zróżnicowania barw obrazów koron sosny na spektrostrefowym zdjęciu lotniczym [5], jak również po zasygnalizowaniu pomyślnego przebiegu moich prac badawczych nad sformulowaniem metody zrelacjonowanej w tej rozprawie. Postawienie tej tezy i podjęcie działania dla jej zweryfikowania jest znakomitym przykładem przejmowania przez środowisko leśników inicjatywy badawczej niezbędnej — moim zdaniem — dla uczynienia z teledetekcji użytecznego instrumentu poznania. Fakt ten jest ponadto dużą satysfakcją, którą sobie szczególnie cenię jako metodyk teledetekcji.

W następnym rozdziale przedstawiam na tle prac prowadzonych przez Instytut Badawczy Leśnictwa swój udział w weryfikowaniu tezy o możliwości określania strat przyrostu miąższości drzewostanów sosnowych zagrożonych przez przemysł na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych. Zdaję sobie bowiem sprawę z tego, że gdyby rzeczywiście istniała zależność między odpowiednio odczytaną treścią zdjęcia spektrostrefowego a stratami przyrostu miąższości drzewostanów, to znaczenie tego faktu — zwłaszcza wobec ogromnej szczegółowości metody fotointerpretacyjnej — trudno byłoby przecenić. Wtedy bowiem — jak sądzę — można by zrezygnować z etapu przejściowego, jakim jest określanie stref

zagrożenia drzewostanów na rzecz wyznaczania wprost stref wielkości strat czynionych przez przemysł w lasach.

5. Analiza możliwości określania strat przyrostu miąższości drzewostanów sosnowych zagrożonych przez przemysł, na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych

W latach 1978—1979 podjęto pierwszą w Polsce i nie mającą odpowiednika w literaturze światowej próbę zbadania możliwości wykorzystania zdjęć lotniczych do określania strat przyrostu drzewostanów sosnowych nękanych dwutlenkiem siarki emitowanym przez elektrownie. Eksperyment był przeprowadzony wspólnie przez Instytut Badawczy Leśnictwa i Ośrodek Przetwarzania Obrazów Lotniczych i Satelitarnych Instytutu Geodezji i Kartografii.

W Instytucie Badawczym Leśnictwa zostały opracowane przez dr inż. Bogdaną Sikorę zasady zakładania i pomiarów powierzchni próbnych do badania wpływu imisji przemysłowych na przyrost drzewostanów sosnowych. W myśl tych zasad wytypowano na terenie Nadleśnictwa Konin 13 drzewostanów sosnowych od III do VI klasy wieku, głównie na siedlisku boru mieszanego świeżego, o możliwie równomiernych czynnikach taksacyjnych. W tych drzewostanach założono powierzchnie próbne o wielkości od 0,5 do 1,0 hektara. Po dokonaniu opisu taksacyjnego, pomiarzeniu pierśnic, wysokości drzew i sporządzeniu krzywej wysokości oraz po wyliczeniu wymiarów drzew próbnych wybrano i ścięto po 13 takich drzew na każdej powierzchni. Na ściętych drzewach próbnych ustalono wiek drzew, długości strzały obecnej oraz wcześniejszych w odstępach 5 lat, pomierzono długości grubizny strzały, wysokości osady korony, jak również wykonano pomiar sekcyjny strzały w korze w sekcjach 2-metrowych oraz pomiar sekcyjny grubości kory. Następnie pobrano wyrzynki ze strzał drzew próbnych, które posłużyły do obliczenia miąższości oraz bieżącego przyrostu miąższości w trzech ostatnich pięcioleciach.

W Ośrodku Przetwarzania Obrazów Lotniczych i Satelitarnych wykonano interpretację spektrostrefowych zdjęć lotniczych drzewostanów reprezentowanych omówionymi powierzchniami próbnymi IBL, zgodnie z zasadami, o których mowa w poprzednich rozdziałach niniejszej rozprawy.

W dalszym ciągu pragnę zaprezentować przebieg i wyniki eksperymentu w tej części, która dotyczy moich poszukiwań związku między zmianami przyrostu miąższości drzewostanów a stopniem ich przemysłowego zagrożenia.

W tablicy 6 przedstawiam dla różnych powierzchni próbnych wielkości bieżącego przyrostu miąższości strzały w korze ΔV w okresie pięciolecia. Wielkości te zostały obliczone jako średnie arytmetyczne z trzech kolejnych pięcioleci poprzedzających badania. Operowanie średnią wielkością pięcioletniego przyrostu miąższości strzały ma na celu złagodzenie skutków fluktuacji przyrostów, którą można zauważyć zwłaszcza w drzewostanach znajdujących się, tak jak tu, pod nękającym wpływem stosunkowo małych stężeń SO_2 .

W tablicy 6 podaję również wiek badanych drzewostanów (L) oraz wielkości wskaźnika częściowych uszkodzeń (u), jak też wielkości wskaźnika zagrożenia.

Tabela 6

Nr pow.	ΔV (m ³ /ha)	L (lata)	u (%)	W	v_1 (m ³ /ha)	v_2 (m ³ /ha)
1	2	3	4	5	6	7
10	17,25	82	8,6	0,90	-2,42	-2,41
18	27,36	53	2,0	0,55	-2,26	-2,27
53	16,48	88	8,6	0,90	-1,60	-1,58
61	20,10	87	5,6	0,74	+0,75	+0,74
92	14,52	85	12,0	1,07	-3,22	-3,26
106	19,17	96	3,4	0,63	+1,48	+1,51
117	25,43	66	4,9	0,70	+0,25	+0,22
120	14,48	93	6,9	0,81	-2,84	-2,83
125	16,19	106	5,8	0,75	+1,97	+1,96
146	32,71	47	5,3	0,73	+2,60	+2,63
150	21,52	89	5,5	0,74	+2,67	+2,70
172	18,78	86	13,7	1,16	+1,87	+1,84
254	20,28	58	28,2	1,92	+0,76	+0,75

Ograniczenie się do jednej tylko fotointerpretacyjnej cechy drzewostanu (tzn. do wskaźnika u) wynika z wcześniejszych rozważań. Wykazałem w nich bowiem, że drzewostany Nadleśnictwa Konin (w których zakładano powierzchnie próbne) są wystarczająco dobrze opisywane tylko wskaźnikiem uszkodzeń częściowych (u) bez potrzeby sięgania do drugiej cechy fotointerpretacyjnej, tzn. do wskaźnika barwy.

Wstępne badanie relacji między przyrostem miąższości (ΔV) a fotointerpretacyjnym wskaźnikiem częściowych uszkodzeń (u) informuje, że prosta zależność między tymi zmiennymi jest zbyt słaba, aby ją można było uznać za użyteczną. Współczynnik korelacji liniowej $r(\Delta V, u) = -0,25$ wskazuje wprawdzie na istnienie pewnej skłonności do korelowania tych zmiennych ze sobą, lecz wiarygodność liczby tego współczyn-

nika jest zbyt mała, aby ją można było uznać za nieprzypadkowo różną od zera.

Zupełnie inna sytuacja powstaje wówczas, gdy uwzględni się zróżnicowanie wieku drzewostanów. Korelacja wieloraka między przyrostem miąższości (ΔV) a wiekiem (L) i wskaźnikiem częściowych uszkodzeń (u) opisana ogólną funkcją typu:

$$\Delta \hat{V} = aL + bu + c \quad (30)$$

opisuje badane zjawisko w sposób budzący zaufanie.

Po rozwiązaniu układu 13 równań typu (30) względem niewiadomych a , b i c otrzymuje się równanie regresji w postaci:

$$\Delta \hat{V} = -0,266L - 0,334u + 44,42 \quad (31)$$

W kolumnie 6 tablicy 6 podaję odchyłki obliczone według ogólnego wzoru:

$$v = \Delta V - \Delta \hat{V} \quad (32)$$

Są one miarą zgodności matematycznego modelu zmienności przyrostu miąższości strzały w korze (31) z faktycznym (tzn. zaobserwowanym bezpośrednio) przebiegiem tego zjawiska w różnowiekowych i różnie zagrożonych przez przemysł drzewostanach Nadleśnictwa Konin.

Współczynnik korelacji wielorakiej obliczony na podstawie wielkości v_1 (kolumna 6 tablicy 6) określa liczba

$$R = 0,91 \quad (33)$$

Wszystkie współczynniki równania (31) są istotnie różne od zera na poziomie istotności 0,05.

Średni błąd określenia przyrostu miąższości na podstawie modelu (31), przy założeniu bezbłędności pomiarów terenowych, wynosi:

$$m_{\Delta V} = \pm 2,2 \text{ m}^3/\text{ha} \quad (34)$$

natomiast błąd względny wyraża się w tym przypadku liczbą

$$\frac{m_{\Delta V}}{\Delta V} = \pm 11\% \quad (35)$$

Skorelowana już silnie dla tego obiektu zależność między wskaźnikiem częściowych uszkodzeń (u) i wskaźnikiem zagrożenia W_t (24) upoważnia także do zbudowania modelu matematycznego zmienności przyrostu miąższości opisującego relację między tą wielkością a wiekiem i wskaźnikiem zagrożenia.

Wykorzystując dane zawarte w tablicy 6 można rozwiązać układ 13 równań typu

$$\Delta \hat{V} = a L + b W + c \quad (36)$$

otrzymując w ten sposób równanie modelu wiążące wprost zmienność bieżącego przyrostu miąższości strzały w korze z używanymi w leśnictwie pojęciami strefy zagrożenia przemysłowego.

W tym przypadku, dla drzewostanów Nadleśnictwa Konin, otrzymuje się:

$$\Delta \hat{V} = -0,266 L - 6,403 W + 47,28 \quad (37)$$

W kolumnie 7 tablicy 6 podaję wielkości odchyłek typu (32) obliczone tym razem z wykorzystaniem równania (37).

Współczynnik korelacji wielorakiej określa w tym przypadku również liczba

$$R = 0,91 \quad (38)$$

Także błąd średni modelu (37) nie uległ liczącej się zmianie i wynosi

$$m_{\Delta V} = \pm 2,18 \text{ m}^3/\text{ha} \quad (39)$$

Z przedstawionego materiału rachunkowego wynika, że oba matematyczne modele zmian przyrostu miąższości strzały, tzn. (31) i (37), są równoznaczne i tak samo opisują badane zjawisko.

Stwierdzenie faktu istnienia możliwości określania na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych wielkości bieżącego przyrostu miąższości strzały niewiele jeszcze znaczy. W tym przypadku ważne jest bowiem to, aby można było określać nie tyle wielkość, co stratę przyrostu miąższości wywołaną nasileniem przemysłowego zagrożenia drzewostanów.

Formalnie rzecz biorąc znajomość postaci modelu, zarówno (31), jak i (37) pozwala, po prostych przekształceniach, otrzymać wzory na wielkość strat przyrostu miąższości względem pewnych wielkości u_0 lub W_0 opisujących drzewostany, o których można powiedzieć, że nie nastąpiło w nich zahamowanie przyrostu wywołane działalnością przemysłu.

Przekształcając równanie (31) otrzymuje się:

$$d \Delta V\% = \frac{33,4 (u_0 - u)}{44,42 - 0,266 L - 0,334 u_0} \quad (40)$$

gdzie u_0 — wskaźnik częściowych uszkodzeń drzewostanu w wieku L , w którym to drzewostanie nie nastąpiło zahamowanie przyrostu miąższości wywołane imisjami przemysłowymi;

u — wskaźnik częściowych uszkodzeń badanego drzewostanu w wieku L określony na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych.

Równanie (40) może nabrać cech użytecznych dopiero wtedy, gdy będzie określona wielkość u_0 , będąca poziomem odniesienia wskaźnika częściowych uszkodzeń.

Wskaźnik u jest cechą fotointerpretacyjną, która w sensie przyrodniczym wyraża bardzo wczesne symptomy procesu wydzielania się posuszu. Metoda fotointerpretacyjna nie jest w stanie samodzielnie rozstrzygnąć, od jakiej wielkości wskaźnika u można mówić o przekroczeniu progu naturalnego procesu wydzielania się posuszu.

Nieco bardziej klarowna sytuacja jest w przypadku wykorzystania modelu zapisanego równaniem (37). Po przekształceniach otrzymuje się wzór na wielkość strat przyrostu miąższości w postaci:

$$d \Delta V\% = \frac{640,3 (W_0 - W)}{47,28 - 0,266 L - 6,403 W_0} \quad (41)$$

gdzie W_0 — wskaźnik zagrożenia drzewostanu w wieku L , w którym to drzewostanie działalność przemysłu nie wpłynęła na przyrost miąższości;

W — wskaźnik zagrożenia drzewostanu, dla którego określa się stratę przyrostu miąższości (fotointerpretacyjnie lub bezpośrednio);

L — wiek drzewostanu.

W tym przypadku łatwiej (choć nie bezdyskusyjnie) jest zdefiniować drzewostan, który nie poniósł uszczerbku w przyroście swej miąższości z tytułu emisji przemysłowych.

Jeżeli przyjmiemy, że drzewostan o wskaźniku $W_0 = 0$ jest z pewnością drzewostanem wolnym od wpływu działalności przemysłu, to na podstawie równania (41) można obliczać wielkości strat przyrostu miąższości strzały w różnych strefach zagrożenia przemysłowego.

W tablicy 7 przedstawiam wielkości strat przyrostu miąższości drzewostanów sosnowych Nadleśnictwa Konin, w różnym wieku, z podziałem na strefy zagrożenia. Dla ścisłości należy dodać, że wielkości strat w III strefie zagrożenia są wynikiem ekstrapolacji i należy do nich podchodzić z ostrożnością.

Tablica 7

Wiek drzewo- stanu	Straty w przyroście miąższości								
	Strefa I			Strefa II			Strefa III		
	od	do	średn.	od	do	średn.	od	do	średn.
40 lat	9%	26%	18%	26%	43%	35%	43%	52%	48%
60	10	30	20	30	51	41	51	61	56
80	12	37	25	37	62	49	62	74	68
100	16	46	31	46	77	62	77	93	85

Wyniki przedstawione w tablicy 7 są zdumiewająco podobne do przyjętych w leśnictwie szacunków strat przyrostu miąższości w zależności od stopnia zagrożenia. W ogólności można powiedzieć, że straty przyrostu określane metodą fotointerpretacyjną są zgodne z wielkościami przyjmo-

wanymi w leśnictwie (tzn. I strefa — 25%, II strefa — 50%, II strefa — 75%) w odniesieniu do drzewostanów w wieku około 80 lat. Jest to jednak stwierdzenie nader ogólne.

Znacznie większe znaczenie powinno się — moim zdaniem — przypisać dwóm innym wnioskom wynikającym z opisanych badań przeprowadzonych na podstawie zdjęć lotniczych, a mianowicie:

1. Wielkość strat przyrostu miąższość jest w ścisłym związku z wiekiem drzewostanu. Nie uwzględniając zróżnicowania wieku można się narażać na drastyczne w skutkach uproszczenia.

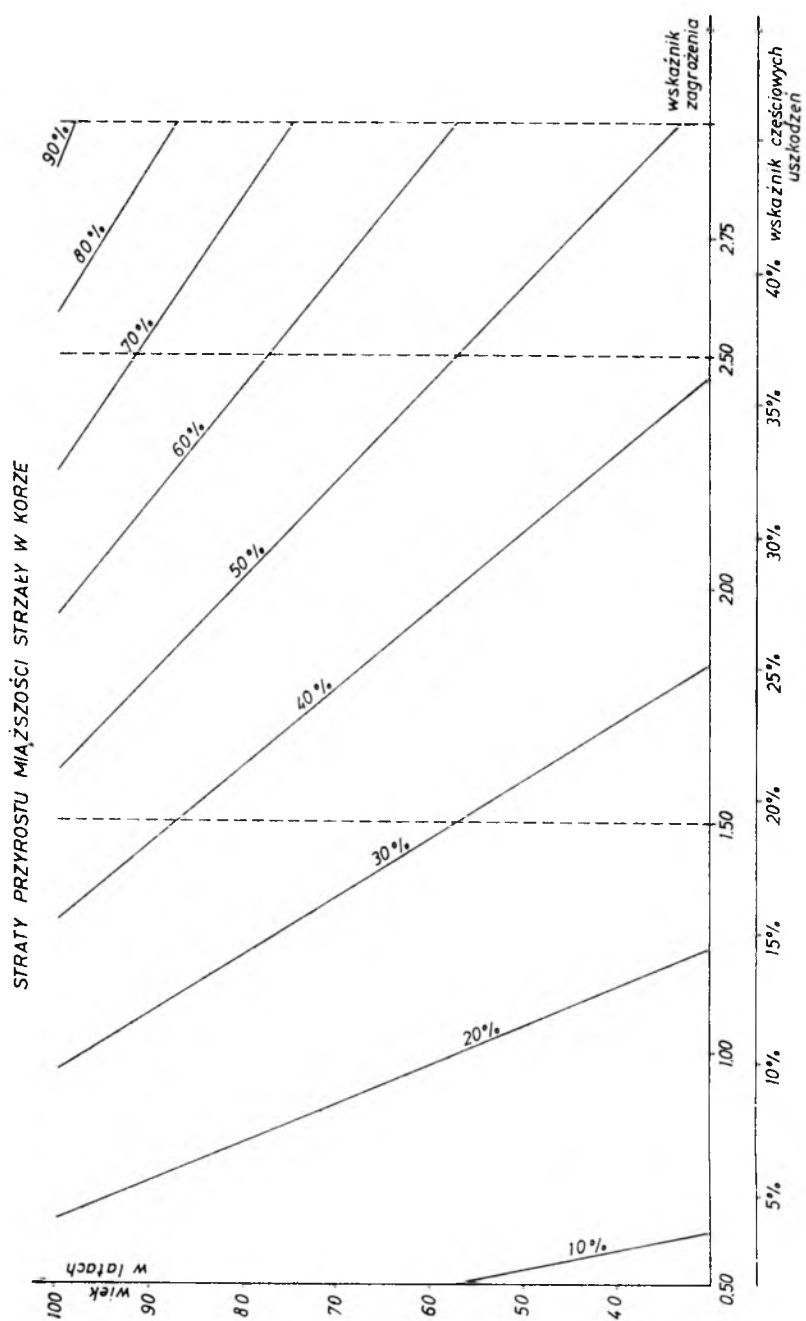
2. Obowiązujące w leśnictwie pojęcie strefy zagrożenia wydaje się zbyt szerokie w sensie dosłownym. Przedział zmienności wskaźnika zagrożenia (W) jest zbyt duży (strefa I: $0,50 \leq W \leq 1,50$, strefa II: $1,50 < W \leq 2,50$, strefa III: $2,50 < W \leq 3,00$). Uzasadnienie tego twierdzenia wynika wprost z danych zawartych w wierszach tablicy 7. Dotyczy to zwłaszcza I strefy zagrożenia.

W świetle tych dwóch wniosków traci znaczenie fakt zgodności średnich wielkości strat przyrostu określanych metodą fotointerpretacji z wielkościami przyjmowanymi obecnie w leśnictwie. Unaocznia to przykład: Jeżeli, stosując metodę terenową, przyporządkuje się drzewostan np. do I strefy zagrożenia, to do dalszych rozważań przyjmie się, że strata przyrostu miąższości wynosi 25%. W rzeczywistości jednak, jak to wynika z tablicy 7, wielkość straty zawiera się w przedziale od 9% do 46% (o ile wiek drzewostanów mieści się w przedziale od 40 do 100 lat). Widać więc, że w skrajnym przypadku szacunek strat, bez uwzględnienia zmieniającego się z wiekiem tempa degradacji drzewostanów i przy nadmiernej generalizacji pojęcia strefy zagrożenia, może powodować blisko 100% błędu oszacowania wysokości straty (25% zamiast np. 46%, co też jest możliwe).

To rozumowanie skłania do zrezygnowania z wykorzystywania pojęcia strefy zagrożenia w sytuacji, gdy otwiera się możliwość określania wielkości strat przyrostu na podstawie zdjęć lotniczych.

Na rysunku 4 przedstawiam diagram umożliwiający określanie strat przyrostu miąższości bądź na podstawie określonego ze zdjęć wskaźnika częściowych uszkodzeń (u), bądź też na podstawie wskaźnika zagrożenia, określonego fotointerpretacyjnie lub w terenie. Ten diagram jest — rzecz jasna — stosowny tylko dla drzewostanów Nadleśnictwa Konin i jest pokazany jako ilustracja możliwości powstałych w wyniku zastosowania opisywanej w tej rozprawie metody.

Rozważania na temat relacji między treścią spektrostrefowych zdjęć lotniczych a zjawiskiem zahamowania przyrostu miąższości drzewostanów wywołanego emisjami przemysłowymi traktuję jako głos otwierający tę niezmiernie istotną kwestię. Uważam, że został w ten sposób otwarty



Rys. 4

nowy rozdział zastosowań teledetekcji w leśnictwie, który dotąd nie ma odpowiednika w literaturze.

Reprezentuję pogląd, że eksperyment przeprowadzony na obiekcie „Konin” dał tak obiecujące rezultaty, że powinien być punktem wyjścia do szeroko zakrojonych badań mających na celu uzyskania uogólnionych wniosków na temat wiarygodności i zakresu stosowania teledetekcji do określania strat w lasach ponoszonych przez gospodarkę narodową w wyniku działalności przemysłu.

6. Podsumowanie i wnioski

1. Przedstawiona w niniejszej rozprawie fotointerpretacyjna metoda określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych uzupełniona analizą określania strat przyrostu miąższości jest wynikiem sześcioletnich badań nad wykorzystywaniem spektrostrefowych zdjęć lotniczych w leśnictwie, które prowadziłem w Ośrodku Przetwarzania Obrazów Lotniczych i Satelitarnych Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie.

2. Sformułowanie metody poprzedziły trzyletnie badania o charakterze podstawowym, mające na celu zwłaszcza wyjaśnienie przyczyn różnicowania barw obrazów koron drzew na zdjęciach spektrostrefowych. Szczególną cechą tych badań było matematycznie udokumentowane istnienie związków korelacyjnych między zmiennością barwy na zdjęciu a jakościową charakterystyką korony drzew oraz wykazanie braku wpływu na zmienność barw tych parametrów drzew i drzewostanów, które uniemożliwiłyby wykorzystywanie teledetekcji do oceny stanu zdrowotnego lasu (zmienność osobnicza budowy korony sosny, odbicie od dna lasu itp.). Badania podstawowe, o których mowa, prowadziłem we współpracy [4], [5], [6], [19], a w niniejszej rozprawie traktuję je jako punkt wyjścia.

3. Metoda określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych została przeze mnie sformułowana po przeprowadzeniu prac, mających na celu głównie zbadanie istnienia siły związku między fotointerpretacyjnymi cechami drzew i drzewostanów a obowiązującą w leśnictwie przyrodniczą definicją stopnia ich zagrożenia. Szczególną wagę przywiązuję do nowo sformułowanej fotointerpretacyjnej cechy rozpoznawczej jaką jest „wskaźnik częściowych uszkodzeń”. Jego znaczenie polega zwłaszcza na tym, że odnosi się on nie do pojedynczych drzew lecz do drzewostanu. Wyodrębnienie tej cechy rozpoznawczej oraz wykazanie istnienia związku między nią a przyrodniczą definicją stopnia przemysłowego zagrożenia drzewostanu stanowi podstawę proponowanej przeze mnie metody. Dzięki temu bowiem fotointerpretacyjna metoda okre-

ślania stref zagrożenia, w pełni respektując przyrodnicze kryteria zagrożenia lasu, zyskała samodzielność w przenoszeniu informacji o pojedynczych drzewach (testowe badania terenowe) na określone fragmenty drzewostanów bez potrzeby uciekania się do stosowania metody reprezentacji.

4. Swego rodzaju ewenementem z punktu widzenia metodyki teledetekcji jest nadanie omawianej metodzie postaci technologicznej. Na ogół to się nie udaje, zwłaszcza przy wizualnej interpretacji zdjęć lotniczych, gdzie czynnik subiektywny zależny od wiedzy i zdolności interpretatora oraz od charakteru badanego obiektu wyklucza formułowanie technologii postępowania. W tym przypadku udało się tak sformalizować zwłaszcza proces interpretacji zdjęć, że można było cały przebieg pracy nad określaniem stref zagrożenia ująć w ścisłe ramy wskazówek wykonawczych, otwierając w ten sposób możliwość wdrożeń również w przedsiębiorstwach (np. w Okręgowych Przedsiębiorstwach Geodezyjno-Kartograficznych lub w oddziałach Biura Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej).

5. Fotointerpretacyjna metoda określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych została sprawdzona w praktyce na obiekcie o powierzchni około 4 tysięcy hektarów lasu będącego pod nękającym wpływem łącznego działania trzech dużych zakładów przemysłowych (dwie elektrownie oraz huta aluminium). Uzyskane wyniki, opisane w niniejszej rozprawie, upoważniają do stwierdzenia, iż stosując metodę fotointerpretacji można uzyskać bardzo szczegółowy obraz zagrożenia drzewostanów nawet wówczas, gdy stopień uszkodzenia jest jeszcze niewielki. Do tego stwierdzenia przywiązuję wagę, gdyż otwiera ono drogę do stratyfikowania jakości drzewostanów nie tylko już uszkodzonych, lecz także znajdujących się na granicy naturalnej odporności ekosystemów leśnych poddawanych stressom.

6. Przeprowadzona w niniejszej rozprawie analiza możliwości określania strat przyrostu miąższości drzewostanów jest — moim zdaniem — interesującym przykładem wskazującym naukom o lesie nowe obszary deliberacji. Przykład ten wykazuje bowiem, że opisany w tej rozprawie oryginalny sposób interpretacji zdjęć spektrostrefowych (operowanie wskaźnikiem barwy i wskaźnikiem częściowych uszkodzeń) czyni, iż określanie na tej podstawie stref przemysłowego zagrożenia nie jest jedynym, lecz jednym z wielu możliwych zastosowań zdjęć spektrostrefowych w leśnictwie. Najogólniej rzecz biorąc twierdzę, że przedstawiony tu sposób interpretacji zdjęć i związany z nim sposób nadawania im treści przyrodniczej może być użyteczny przy badaniu stanu zdrowotnego drzewostanów iglastych naruszonego przez różne czynniki sprawcze, o ile tylko skutki działania tych czynników będą się uwidaczniać w koronach drzew. To przeświadczenie potwierdzają będące w toku prace naukowo-badaw-

cze nad wykorzystywaniem zdjęć spektrostrefowych do badania uszkodzeń drzewostanów spowodowanych czynnikami biotycznymi. Mam na myśli jeszcze nie opublikowane prace związane z badaniem rozprzestrzeniania się uszkodzeń sosny wywołanych przez hubę korzeni (*Trametes radiciperda*), badanie skutków gradacji brudnicy mniszki (*Lymantria monacha* L.) w Borach Tucholskich, poprocha cetyniaka (*Bupalus piniarius* L.) w Puszczy Augustowskiej, oraz kornika drukarza (*Ips typographus* L.) w Puszczy Knyszyńskiej. W każdym z wymienionych przypadków jest wykorzystywany sposób interpretacji zdjęć wynikający wprost z zasad przyjętych w fotointerpretacyjnej metodzie określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych.

7. Jedyne merytoryczne ograniczenie stosowania metody fotointerpretacyjnej dotyczy zagrożeń dużych (III strefa). Wynika ono jednak nie tyle z samej metody, co raczej z sytuacji, w jakiej znajdują się obszary leśne zaliczane do tej strefy zagrożenia. Są to obszary, na których leśnicy prowadzą walkę już nie o dorodny drzewostan, ale o utrzymanie często już tylko jakiegokolwiek formy życia roślinnego. To sprawia, że w strefie dużego zagrożenia mamy zwykle do czynienia z drzewostanami w przebudowie. W wyniku takich prac na pniu pozostają tylko te drzewa ustępującego drzewostanu, które jeszcze opierają się presji czynników degradujących. Z natury rzeczy są to drzewa lepsze od tych, które zostały usunięte jako sklasyfikowane do III strefy zagrożenia. W efekcie na zdjęciu lotniczym zostaje zarejestrowany obraz, którego treść — w rozumieniu fotointerpretacji — nie odpowiada tak silnym uszkodzeniom koron, jakie są symptomatyczne dla III strefy zagrożenia. To ograniczenie traci — rzecz jasna — znaczenie w tych rejonach, gdzie w strefę silnych uszkodzeń nie wkroczone jeszcze z zabiegami.

Mimo tego ograniczenia zdecydowałem uznać opisywaną metodę jako wystarczająco udokumentowaną, aby mogła być upowszechniana. Już zdobyte doświadczenie upoważnia do twierdzenia, że postawiona we wstępie pracy teza jest uzasadniona. Opracowana metoda zdaje egzamin zwłaszcza w odniesieniu do drzewostanów zagrożonych w niewielkim jeszcze stopniu, a takie drzewostany przeważają powierzchniowo w Polsce. Ponadto, jeżeli leśnicy mają szansę przeciwdziałania szkodom przemysłowym, to jest ona tym większa, im we wcześniejszym stadium degradacji nastąpi interwencja. Metoda fotointerpretacyjna w znacznym stopniu umożliwia wczesne rozpoznawanie zjawiska powstawania szkód. Podobnie technologowie przemysłu, jako jedyni władni zapobieganiu szkodliwym emisjom, mają większe szanse regulowania procesami produkcji w kierunku wdrażania technologii mniej agresywnych względem otoczenia, jeżeli dostatecznie wcześnie będą znali uboczne skutki działalności przemysłu.

Myślę, że fotointerpretacyjna metoda określania stref przemysłowego zagrożenia drzewostanów znajdzie uznanie w oczach leśników, dla których jest opracowana, jak również w kręgu specjalistów zajmujących się kształtowaniem krajobrazu i ochroną środowiska człowieka.

L I T E R A T U R A

- [1] Arnberg W., Wastenson L.: *Use of aerial photographs for early detection of bark beetle infestation of spruce*. Department of Physical Geography, University of Stockholm 1977.
- [2] Assman E.: *Nauka o produktywności lasu*. PWRiL 1968.
- [3] Brandt Z., Stafford C.: *Effects of air pollution on plants*. Air pollution, vol. 1, New York and London 1962.
- [4] Bychawski W., Iracka M., Mozgawa J.: *Wykorzystanie lotniczych zdjęć spektrostrefowych do badania uszkodzeń drzewostanów sosnowych*. Prace IGiK 1 (55) 1977.
- [5] Bychawski W., Iracka M.: *Przyczyny zróżnicowania barw obrazów koron sosny na spektrostrefowym zdjęciu lotniczym*. Prace IGiK z. 3 (60) 1978.
- [6] Bychawski W., Iracka M.: *Określanie na podstawie spektrostrefowych zdjęć lotniczych stref zagrożenia drzewostanów sosnowych będących pod wpływem szkodliwego działania zakładów przemysłowych*. Prace IGiK z. 2 (59) 1978.
- [7] Ciołkosz A., Kęsik A.: *Promieniowanie podczerwone w badaniach środowiska geograficznego*. Przegląd Geograficzny nr 4 1970.
- [8] Ciołkosz A., Bychawski W.: *Przegląd metod fotointerpretacji z punktu widzenia pozyskiwania informacji*. AGH Kraków 1976.
- [9] Ciołkosz A., Bartman E., Bychawski W.: *Zastosowanie metod fotointerpretacji w badaniach szaty roślinnej i rolniczego użytkowania ziemi*. AGH Kraków 1976.
- [10] Fairweather S. E., Meyer M. P., French D. W.: *The use of aerial photography for dutch elm disease detection*. Institute of Agriculture, Forestry, and Home Economics Remote Sensing Laboratory, University of Minnesota 1978.
- [11] Fox L. III: *The effect of canopy composition on the measured and calculated reflectance of conifer forests in Michigan*. Humboldt State University. Forestry Department Arcata, California 1978.
- [12] Fritz N. L.: *Optimum methods for using infrared-sensitive color films*. Photogrammetric Engineering Nr 33 1967.
- [13] Gaucher D., Walker J. E., Schott J. R.: *Applications of photometric process in monitoring vegetation damage due to external stresses*. Buffalo 1978.
- [14] Gimbarzevsky P.: *Remote Sensing in the interpreted survey of biological resources*. Symposium IUFRO, Freiburg 1973.
- [15] Harin N. G.: *Distancionnye metody izucenia rastitelnosti*. Akademia Nauk SSSR, Akademia Nauk Turkmenskoj SSR, Moskva 1975.
- [16] Heller R.C.: *Large-scale photo assesment of smog-damaged pines*. New Horizons in Color Aerial Photography. American Society of Photogrammetry 1969.

- [17] Heller R. C.: *Case applications of remote sensing vegetation damage assessment*. University of Idaho 1978.
- [18] Howard J. A.: *The Reflective foliaceous properties of tree species*. Application of remote sensors in forestry IUFRO section 25. Freiburg 1970.
- [19] Iracka M., Bychawski W.: *Badanie wpływu spadku żywotności drzew w drzewostanach sosnowych na ich barwę na spektrostrefowych zdjęciach lotniczych*. Komitet Badań Kosmicznych PAN 1980.
- [20] Kamieniecki F.: *Szkody w lasach spowodowane wzrostem przemysłowego zanieczyszczenia powietrza w latach 1967—1971*. Sylwan 12/1972.
- [21] Kenneweg H., Hildebrandt G.: *Interpretation von Luftaufnahmen für die Erforschung und Gestaltung von Vegetation Beständen in Westdeutschen Ballungsraumen*. Freiburg 1973.
- [22] Kenneweg H.: *Color and False-Color Photography its growing use in Forestry*. Application of Remote Sensing in Forestry IUFRO section 25, Freiburg 1970.
- [23] Knippling E. B.: *Leaf reflectance and image formation on colorinfrared films*. Remote Sensing in Ecology. University Georgia Press, Athens 1969.
- [24] Knippling E. B.: *Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation*. Remote Sensing Environmental 1970.
- [25] Latocha E.: *O przebudowie drzewostanów i wrażliwości drzew na emisje przemysłowe*. Sylwan 2/1975.
- [26] Lee Y. J., Wear J. F.: *Microdensitometry to identify douglas-fir tussock moth defoliation on color IR aerial photos*. Pacific Forest Research Centre, Canada, Forest Insect and Disease Management USA, 1978.
- [27] Lehninger A. L.: *Biochemia*. PWRiL Warszawa 1979.
- [28] Molenda T.: *Szkody przemysłowe w leśnictwie*. Sylwan 9/1968.
- [29] Murtha P. A.: *Classification of forest damage from photos. A guide to air photo interpretation of forest damage in Canada*. Canadian Forestry Service. Ottawa, 1972.
- [30] Murtha P. A.: *Remote sensing and vegetation damage. A theory for detection and assessment*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44 Nr 9, 1978.
- [31] Murtha P. A.: *Vegetation damage and remote sensing. Principal problems and some recommendations*. XIII Congress of International Society of Photogrammetry, Helsinki, 1976.
- [32] Nelson H. A.: *Small format color photography for forest plantation planning in the Southeast*. Colorado State University 1977.
- [33] Pelc E., Drechsler M.: *Zastosowanie zdjęć lotniczych do inwentaryzacji uszkodzeń drzewostanów spowodowanych przez dymy przemysłowe*. Poczdam 1977.
- [34] Sapp C. D.: *Detecting the effects of sulfur dioxide emissions on vegetation by remote sensing*. Alabama 1978.
- [35] Sayn-Wittgenstein L.: *Large-scale aerial photography and radar altimetry*. The state of the art. IUFRO section 25 Freiburg 1970.
- [36] Sayn-Wittgenstein L., Aldred A. H.: *The role of remote sensing*. Canadian Forestry Service, Ottawa 1976.
- [37] Stellingwert D. A.: *Practical applications of aerial photographs in forestry and other vegetation studies*. Published by ITC Nr 36 Delft. The Netherlands.

- [38] Schnaider Z.: *Zdrowotność lasów Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*. Sylwan 12/1972.
- [39] Schnaider Z.: *Uwagi dotyczące doświadczeń i badań leśnych w regionach przemysłowych*. Sylwan 7/1975.
- [40] Tonelli A. M.: *The use of vegetation as a transducer for environmental pollution*. Milan, Italy 1978.
- [41] Ullman J. J., French D. W.: *Wykrywanie uszkodzeń dębu za pomocą fotografii barwnej w podczerwieni*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing vol. 43 Nr 10 1977.
- [42] Weber F. P., Polcyn F. C.: *Remote sensing to detect stress in forest*. Photogrammetric Engineering 1972.
- [43] Wart S. L., Roettgering B.: *Douglas-fir beetle survey with color photos*. Photogrammetric Engineering 1968.
- [44] Więckowski S.: *Problem wpływu pyłów i gazów przemysłowych na biocenozę leśną i jego znaczenie dla ochrony zdrowia człowieka*. Sylwan 3/1971.
- [45] Wolak J.: *Wpływ emisji przemysłowych na las. Metodologiczna podstawa badań*. Sylwan 4/1969.
- [46] Wolak J.: *Wpływ przemysłowych zanieczyszczeń atmosfery na ekosystemy leśne*. Wydawnictwa Czasopism Technicznych NOT 1979.
- [47] Zybura H.: *Długość koron drzew w drzewostanach sosnowych*. Sylwan 1/1977.

Recenzował: doc. dr hab. Andrzej Ciołkosz

ЯНУШ ВОЙЦЕХ ВЫХАВСКИ

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ АЭРОСНИМКОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ПРОМЫШЛЕННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

Резюме

Развитие промышленности влечет увеличение лесных пространств, находящихся под влиянием промышленного загрязнения атмосферного воздуха. Особенно вредной для лесов является двуокись серы, эмиттированная в атмосферу электростанциями, работающими на каменном и буром угле.

Лесная служба в Польше ведет ряд лет систематическую инвентаризацию степени повреждения древостоев промышленностью. Эти исследования производятся методом пробных поверхностей, из которых каждая характеризуется около 50 га леса. Показательным видом является сосна. Степень повреждения древостоя определяется в цифрах на основе анализа морфологических изменений кроны и игольника, проводимого после срубki пробных деревьев.

Представленный в данной работе метод фотоинтерпретации обращается к природным критериям степени повреждения сосновых древостоев промышленностью. Разработан способ интерпретации спектрональных аэроснимков, который дает измеримую (числовую) характеристику как изображения единичных крон деревьев, так и определенных фрагментов древостоев. Используя эти ха-

рактеристики, были проведены исследования основного характера, имеющие целью определение природных причин дифференциации цвета на спектрозональных аэроснимках. В результате этих исследований выяснены основные причины изменения цветов спектрозональных изображений крон сосны (*Pinus silvestris*), а также исключено влияние тех факторов, наличие которых могло бы исключить возможность использования изменчивости цвета для оценки состояния здоровья деревьев (например, растительность на дне леса или натуральное наличие мертвых ветвей ниже компенсационного пункта).

Проведенные основные исследования дали право для поиска математической зависимости между фотоинтерпретационной характеристикой деревьев и древостоев со степенью повреждения древостоев, определенных согласно природным критериям, обязывающим в польском лесном хозяйстве. В результате проведенных исследований установлено существование корреляционных зависимостей между этими величинами и разработано метод действий, дающий возможность создания математических моделей, описывающих пространственное распределение промышленного повреждения сосновых древостоев.

Рассмотренный в данной работе метод был использован для исследования около 4000 га сосновых древостоев, находящихся под влиянием эмиссии электростанции, работающей на буром угле. На рисунке 2 представлен фрагмент карты зон промышленной угрозы, составленной описанным методом. Особенной чертой фотоинтерпретационного метода является его почти любая подробность. На представленной карте зоны повреждения определено в четыре раза подробнее, чем на представляемых полевым методом.

Большая подробность фотоинтерпретационного метода разрешила кроме того создать математическую модель потенциальной угрозы для территории, окружающей источник промышленной эмиссии, таким образом указать места угрозы даже там, где нет леса (рис. 3). Это предоставляет возможность правильного пространственного благоустройства окрестностей больших промышленных предприятий.

Особым вопросом рассматриваемым в статье (раздел 5), являются исследования по возможности определения на основе спектрозональных снимков потерь прироста массы сосновых древостоев, пребывающих длительное время в промышленных районах. Получено многообещающие результаты, которые после накопления более богатого эмпирического материала, должны дать возможность определения финансовых потерь, вызванных в лесном хозяйстве промышленной эмиссией.

Фотоинтерпретационный метод после небольших модификаций пригоден также для исследования повреждений леса, вызванных биотическими факторами. Проведены удачные попытки определения последствий градации насекомых вредителей (*Bupalus piniarius* и *Lymantria monacha*), а также повреждений сосны, вызванных трутовиком корней (*Trametes radiciperda*).

Перевод: Róża Tolstikowa

JANUSZ WOJCIECH BYCHAWSKI

APPLICATION OF COLOUR INFRARED PHOTOGRAPHS FOR DETERMINATION OF INDUSTRIAL IMPEDENCE ZONES OF THE PINE-TREE STANDS

Summary

Industrial development causes enlargement of forest areas, being under the influence of industrial pollution of atmospheric air. Particular damages are caused by the sulphur dioxide, emitted in most cases by power plants, heated with brown or pit-coal.

Systematical inventory of the degree of industrial impendence of stands, has been carried out by the forest service in Poland for many years. The methods of test areas, each representing approximately 50 hectares of forest, have been applied. Pine-trees are the indicating type of trees. The degree of impendence of stands is numerically determined on the base of analysis of morphological changes of the head and litter of conifer needles, elaborated after the truncation of the test tree.

Photointerpretation method, presented in this work, refers to the biological criteria of the determination of industrial impendence of pine-tree stands. The method of interpretation of aerial colour infrared photographs has been elaborated; it enables measurable (numerical) characteristics of images of the single heads, as well as of the particular parts of stands. Basic investigations, aiming at the determination of biological reasons of the diversification of colours on aerial colour infrared photographs, have been carried out with the use of the above mentioned characteristics. As the result of these investigations, main reasons of colour variability of colour infrared images of pine-tree head (*Pinus silvestris*) have been explained, and the influence of such factors, which could preclude the application of the colour variability for the determination of the health state of trees (for example vegetation at the bottom of the forest or the natural presence of branches below the compensating point) has been excluded.

The investigations, which have been carried out, allowed to search for the mathematical relations connecting the photointerpretation method of obtaining the characteristics of trees and stands with the impendence degree, determined on the base of biological criteria, used in Polish forestry. As the result of investigations, the correlative relations between these values have been stated, and the method allowing the creation of mathematical models, describing the spatial distribution of industrial impendence of pine-tree stands, has been elaborated.

The discussed method was applied for the examination of nearly 4000 hectares of pine-tree stands, being under the influence of power plants, heated with the brown coal.

Part of the map of industrial impendence, elaborated on the base of discussed method, is presented in fig. 2. The particular feature of the photointerpretation method is its almost arbitrary minuteness of detail.

On the presented map, the impendence zones have been established 4 times more in detail, than in the case of terrain presentation.

Besides, high minuteness of detail of photointerpretation method allowed to create the mathematical model of potential impendence of the areas surrounding the sources of industrial emission, showing in this way the impendent areas, even in the places, where there is no forest (fig. 3). It enables the proper spatial management of the vicinities of large industrial plants.

The investigations on the pulp growth of the pine-tree stands, remaining in the industrial regions for the longer periods of time, on the base of colour infrared photographs, are the separate problem discussed in this paper (chapter 5).

The results are full of promise; after the collection of empirical data they should enable the determination of financial loss, caused by the industrial emission in forest economy.

The photointerpretation method, after small modifications, can also be applied for the examination of forest damages caused by biotic factors. Successful experiments with determination of results of gradation of insect pests (*Bupalus piniarius* and *Lymantria monacha*) and damages of pines, caused by the root polypore (*Trametes radiciperda*) have been carried out.

Translation: Jacek Domański

SPIS TREŚCI

ANDRZEJ HERMANOWSKI

IRMINA LAUDYN

Obliczanie pionowych przemieszczeń budowli 3

JANUSZ WOJCIECH BYCHAWSKI

Zastosowanie lotniczych zdjęć spektrostrefowych do określania stref
przemysłowego zagrożenia drzewostanów sosnowych 27

СОДЕРЖАНИЕ

АНДЖЕЙ ХЕРМАНОВСКИ

ИРМИНА ЛЯУДЫН

Вычисление вертикальных сдвигов строительных объектов 25

ЯНУШ ВОЙЦЕХ БЫХАВСКИ

Применение спектрозональных аэроснимков для выделения зон про-
мышленного повреждения сосновых древостоев 80

CONTENTS

АНДЖЕЙ ХЕРМАНОВСКИ

IRMINA LAUDYN

Computation of vertical dislocations of structures 26

JANUSZ WOJCIECH BYCHAWSKI

Application of colour infrared photographs for determination of industrial
impedence zones of the pine-tree stands 82