

ZBIGNIEW BOCHENEK

Wykorzystanie wielospektralnych zdjęć lotniczych do klasyfikacji niektórych gatunków roślin uprawnych

Zarys treści. Artykuł przedstawia wyniki badań nad opracowaniem teledetekcyjnej metody rozpoznawania gatunków roślin uprawnych. Została w nim przedstawiona problematyka związana ze stosowaniem techniki fotografii wielospektralnej, zagadnienia dotyczące zasad analizy mikrofotometrycznej zdjęć wielospektralnych, jak również przedstawiono metodę statystycznego opracowania wyników tej analizy i klasyfikacji upraw. Podsumowaniem pracy są wnioski dotyczące doboru pasm spektralnych i okresów fotografowania najważniejszych z punktu widzenia rozróżnialności badanych gatunków roślin uprawnych.

Wstęp

Jednym z podstawowych problemów naszej gospodarki narodowej jest intensyfikacja produkcji rolnej. Prowadzone w szerokim zakresie działania, zarówno o charakterze wykonawczym, jak i badawczym, zmierzają do utworzenia systemu produkcji roślinnej adekwatnego do bieżących potrzeb społecznych. W tym systemie podstawową rolę musi odgrywać dokładna i wiarygodna informacja o charakterze produkcji roślinnej w naszym kraju. Dotychczasowe metody otrzymywania tej informacji są w dużym stopniu nieprecyzyjne. Opierają się one głównie na obserwacjach terenowych prowadzonych w toku tzw. spisu czerwcowego. Nie deprecjonując wartości materiałów spisowych trzeba jednak zwrócić uwagę na pewne cechy ograniczające użyteczność tej metody. Do nich należy zaliczyć przede wszystkim pracochłonność i wysokie koszty przedsięwzięcia, związane z angażowaniem dużej liczby osób do wykonania akcji spisowej. Decydującym czynnikiem wpływającym na dokładność tej metody wydaje się być subiektywizm informacji uzyskiwanej w trakcie zbierania danych, jak również niejednoczesność jej otrzymywania.

W tej sytuacji celowe wydaje się zastosowanie metody, która umożliwiłaby pozyskiwanie stosunkowo dokładnych informacji o strukturze upraw w sposób bardziej zobiektywizowany, stanowiąc formę reprezentatywnej kontroli spisu terenowego. Jedną z nowoczesnych metod, mogącą służyć do tego celu, może być metoda teledetekcji, czyli badań bezkontaktowych, umożliwiających analizę obiektów, zjawisk i procesów zachodzących na powierzchni ziemi. Podstawowe zalety, jakie oferuje metoda teledetekcji w badaniach rolniczych to:

- możliwość jednoczesnej rejestracji stosunkowo dużych obszarów,
- obiektywność pozyskiwanych informacji,

— możliwość automatycznej interpretacji dużej ilości pozyskiwanych informacji.

Jedną z technik teledetekcji, najpowszechniej dotychczas stosowaną, jest fotografia lotnicza. W badaniach środowiska geograficznego stosuje się różne jej rodzaje charakteryzujące się innym sposobem i zakresem rejestrowanego promieniowania. W przedstawianej pracy została wykorzystana najnowsza, dostępna w kraju technika rejestracji fotograficznej — fotografia wielospektralna. Celem tej pracy było opracowanie metody identyfikacji wybranych gatunków roślin uprawnych odfotografowanych na wielospektralnych zdjęciach lotniczych oraz ocena dokładności tej metody. W pracy zostały omówione zagadnienia związane z optymalnym sposobem rejestracji odbicia spektralnego poszczególnych gatunków roślin uprawnych w różnych stadiach ich rozwoju, zagadnienia dotyczące zasad analizy mikrofotometrycznej zdjęć wielospektralnych, jak również zastosowania statystycznej metody opracowania wyników tej analizy i próby korelacji spektralnych charakterystyk roślin uprawnych z ich stanem rozwojowym.

Charakterystyka systemu pozyskiwania zdjęć wielospektralnych

Pierwszym etapem prac przygotowawczych był wybór systemu pozyskiwania zdjęć wielospektralnych. System taki powinien spełniać szereg warunków, determinujących tworzenie obrazów o wysokiej jakości geometrycznej spektrometrycznej. Do tych warunków należą:

1. Wysoka zdolność rozdzielcza układów optycznych,
2. Wielkości odległości obrazu odpowiednie do długości fali światła przepuszczanej przez filtr,
3. Równoległość osi optycznych obiektywów,
4. Wysoka dokładność działania mechanizmów migawkowych i synchronizacji ekspozycji,
5. Minimalny spadek jasności obiektywów,
6. Minimalna, jednakowa wielkość dystorsji układów optycznych,
7. Brak obserwacji chromatycznych w układach optycznych,
8. Zachowanie płaskości błony w trakcie ekspozycji.

Spełnienie warunków wyznaczających wysoką jakość geometryczną zdjęć wielospektralnych ma podstawowe znaczenie przy ich dalszym opracowywaniu metodą tworzenia kompozycji barwnych. Zdjęcia wielospektralne przeznaczone do analizy mikrofotometrycznej powinny charakteryzować się przede wszystkim wysoką jakością spektrometryczną. Podstawową cechą determinującą jakość spektrometryczną jest równomierność oświetlenia całej płaszczyzny obrazu. Dokładność spełnienia tego warunku jest uzależniona od wielkości spadku jasności układu

optycznego. W miarę oddalania się od osi optycznej następuje bowiem zmniejszenie ilości energii świetlnej docierającej do płaszczyzny obrazu, co wyraża wzór:

$$E = E_0 \cos^4 \alpha \quad (1)$$

gdzie E_0 — ilość energii świetlnej na osi optycznej obiektywu,

α — kąt odchylenia osi wiązki od osi optycznej obiektywu.

Jest to wzór definiujący teoretyczny spadek jasności obiektywu. W praktyce rozkład oświetlenia płaszczyzny obrazu zmienia się wraz ze zmianą otworu względnego, przy czym odstępstwa od wzoru (1) dla dużych otworów względnych mogą być dość znaczne. Dlatego też, dla zapewnienia wysokiej dokładności opracowań, należy doświadczalnie wyznaczać wielkość otworu względnego, przy którym występuje najmniejszy spadek jasności obiektywu.

W omawianej pracy wykorzystano dwa systemy fotograficznej rejestracji wielospektralnej, a mianowicie:

1. Układ 4 kamer fotograficznych Hasselblad 500EL/M z zespołem filtrów,

2. Kameral wielospektralną NAC MB-470.

Dane techniczne obu systemów zostały przedstawione w tablicy 1.

Tablica 1

	Hasselblad 500 EL/M	NAC MB-470
ogniskowa obiektywu	80 mm	40 mm
otwór względny	1 : 2,8—1 : 22	1 : 2,8—1 : 16
pole widzenia	52°	46°
migawka	Synchro-Compur	Rotacyjna
	B, 1—1/500 sek	1/125—1/250 sek
format zdjęć	55×55 mm	24×24 mm

W celu określenia jakości spektrometrycznej wyżej wymienionych systemów zostały przeprowadzone dwa rodzaje badań testowych

1. Wyznaczenie zmian transmisji promieniowania przez układ optyczny w funkcji długości fali,

2. Wyznaczenie spadku jasności układu optycznego w funkcji kąta obserwacji.

Wyniki tych badań pozwoliły na sformułowanie następujących praktycznych wniosków do prac związanych z ekspozycją i analizą zdjęć:

1. Do ekspozycji materiałów fotograficznych nie należy stosować maksymalnych otworów względnych,

2. Do analizy mikrofotometrycznej należy wykorzystywać centralne

części zdjęć (w promieniu 25 mm od środka zdjęcia przy formacie 55×55 mm, 10 mm od środka zdjęcia przy formacie 24×24 mm).

Drugim etapem prac przygotowawczych był wybór odpowiednich filtrów selektywnych do stosowanych systemów wielospektralnych. Istnieją dwa typy filtrów selektywnych, różniące się budową i właściwościami przepuszczania promieniowania. Są to filtry interferencyjne i absorpcyjne. Filtry interferencyjne charakteryzują się:

1. Wysokim maksymalnym stopniem przepuszczalności (ok. 80—90%),
2. Wąskim spektralnym pasmem przepuszczania,
3. Zmianą długości fali przepuszczanego promieniowania w zależności od kąta padania promieni świetlnych i temperatury własnej filtru.

Filtry absorpcyjne charakteryzują się na ogół mniejszą maksymalną przepuszczalnością i szerszym pasmem spektralnym przepuszczania, nie zmieniają natomiast swych właściwości pod wpływem zmian oświetlenia i temperatury. Dla prawidłowego wykorzystania filtrów absorpcyjnych niezbędne są dwie podstawowe informacje:

1. Znajomość zmian transmisji promieniowania przez dany filtr w funkcji długości fali,
2. Znajomość współczynników przedłużenia ekspozycji przy wykorzystaniu poszczególnych filtrów.

W przedstawionej pracy autor dysponował zestawem 10 filtrów absorpcyjnych firm Kodak i Hasselblad. W trakcie prac przygotowawczych zostały wyznaczone spektrofotometrycznie spektralne charakterystyki tych filtrów oraz określone ich pasma przepuszczalności. Z przebadanego zestawu zostały wybrane cztery filtry Kodak Wratten, a mianowicie:

- | | |
|-------------|------------------------|
| niebieski | — Nr 47B (410—460 nm), |
| zielony | — Nr 58 (505—560 nm), |
| czerwony | — Nr 25 (600—700 nm), |
| podczerwony | — Nr 87 (770—900 nm). |

Aby wyżej wymienione filtry mogły spełniać rolę filtrów pasmowych, do rejestracji promieniowania przez nie przepuszczanego zostały dobrane odpowiednie błony fotograficzne, a mianowicie:

1. Dla zakresu promieniowania widzialnego — błona panchromatyczna Kodak Tri-X Aerographic 2403 o górnej granicy uczulenia ok. 700 nm,
2. Dla zakresu promieniowania podczerwonego — błona Kodak Infra-red Aerographic 2424 o górnej granicy uczulenia ok. 900 nm.

Stosując wymienione błony fotograficzne oraz filtry został utworzony system pasmowej rejestracji promieniowania w czterech nie pokrywających się zakresach spektrum. Został on zastosowany w omawianej pracy dla układu kamer Hasselblad.

W przypadku drugiego systemu wielospektralnego, kamery NAC MB-

-470 wyposażonej przez producenta w standardowy zestaw filtrów, a mianowicie filtr niebieski (47B), zielony (57A), czerwony (25) i podczerwony (88A), przeprowadzone zostały badania spektrofotometryczne w celu praktycznego określenia przedziałów przepuszczalności tych filtrów. Badania wykazały, iż wymieniony zestaw filtrów umożliwia podział promieniowania na bardzo zbliżone zakresy spektrum do stosowanych dla kamer Hasselblad. Pozwoliło to na jednorodną analizę materiałów zdjęciowych uzyskanych za pomocą obu systemów wielospektralnych.

Kolejnym, ważnym etapem prac przygotowawczych było ustalenie zasad wykonywania ekspozycji w fotografii wielospektralnej. Jak wiadomo, podstawowym czynnikiem mogącym każdorazowo modyfikować wielkość ekspozycji jest oświetlenie obiektu. Czynniki wpływające na wielkość ekspozycji z tytułu zmian oświetlenia można podzielić na dwie grupy:

1. Regularne zmiany natężenia i składu spektralnego promieniowania słonecznego,
2. Nieregularne zmiany jasności obiektu wywołane warunkami atmosferycznymi.

Regularne zmiany oświetlenia związane są z pozornym ruchem Słońca. W celu praktycznego zbadania wpływu tego ruchu (zmian wysokości Słońca) na skład spektralny promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi zostały przeprowadzone badania testowe. Polegały one na rejestrowaniu obrazów wielospektralnych klina szarości w ustalonych przedziałach czasowych i analizie zmian stosunku odbicia poszczególnych zakresów spektrum w funkcji czasu fotografowania. Badania te wykazały, iż w przedziale wysokości Słońca odpowiadającym okołopołudniowym porom fotografowania (godz. 10—15) powyższe zmiany są zaniedbywalne.

Oprócz omówionego wpływu regularnych zmian oświetlenia, na wielkość ekspozycji mają również wpływ zmiany nieregularne, wywołane czynnikami atmosferycznymi. Do nich zalicza się przede wszystkim występowanie chmur oraz mgiełki atmosferycznej i zanieczyszczeń powietrza. Wpływ tych czynników z powodu ich zmienności oraz nieprecyzyjności określenia, jest w praktyce trudny do wyznaczenia. Znane są teoretyczne zależności ujmujące wpływ tłumienia atmosfery z uwagi na występowanie zanieczyszczeń oraz mgiełki atmosferycznej. Jednakże w praktyce niemożliwe jest ciągle wyznaczanie stopnia i charakteru zanieczyszczenia warstwy powietrza między obiektem terenowym a kamerą fotograficzną umieszczoną na pokładzie samolotu. Dlatego też w omawianej pracy postanowiono wykonywać zdjęcia wielospektralne jedynie przy normalnej przejrzystości powietrza (braku mgiełki atmosferycznej) oraz przy możliwie bezchmurnej pogodzie.

Charakterystyka obiektu i przebiegu prac badawczych

Obiekt dla przeprowadzenia prac badawczych zmierzających do opracowania metody zdalnego określania struktury upraw powinien spełniać szereg warunków determinujących jakość wykonywanych badań, a mianowicie:

1. Zawierać gatunki roślin uprawnych najważniejsze z punktu widzenia gospodarki rolnej,
2. Posiadać dokładną charakterystykę przyrodniczą,
3. Składać się z pól doświadczalnych poddawanych różnym zabiegom agrotechnicznym,
4. Podlegać bieżącej kontroli wpływów meteorologicznych.

Jako spełniający powyższe warunki został wybrany obiekt składający się z pól doświadczalnych Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Radzikowie k/Warszawy oraz pól produkcyjnych Państwowych Gospodarstw Rolnych Leszno—Białuty i Łązniew. Na obszarze wyżej wymienionych gospodarstw rolnych zostały wytypowane pola reprezentujące 6 gatunków roślin uprawnych: pszenicę ozimą, jęczmień jary, rzepak, kukurydzę, buraki cukrowe i ziemniaki. W ramach współpracy z IHAR została sporządzona pełna charakterystyka przyrodnicza obiektu. Dla każdego z pól sporządzono „metrykę”, w której zawarto następujące dane:

1. Typ gleby,
2. Gatunek roślin (odmiana),
3. Data i technika zasiewu (sadzenia),
4. Data kwitnienia i dojrzałości,
5. Powierzchnia uprawy.

W przeciągu okresu wegetacyjnego była prowadzona również kontrola wpływu warunków meteorologicznych i czynników biotycznych na stan rozwojowy roślin. Wykonywane były obserwacje zmian poszczególnych zespołów roślinnych powodowanych przez czynniki patogenne (choroby, szkodniki) oraz uszkodzeń wywołanych czynnikami typu atmosferycznego (wiatr, grad itp.). Podstawowym celem zbierania w/w informacji było uzasadnienie zmienności odbicia spektralnego poszczególnych upraw, jak również wyeliminowanie w trakcie tworzenia wzorców, obszarów poddanych ekstremalnie niekorzystnym czynnikom środowiskowym.

Następnym etapem prac przygotowawczych związanych z obiektem badań było ustalenie odpowiedniej skali wielospektralnych zdjęć lotniczych. Przeanalizowane zostały uwarunkowania skali spowodowane wymiarami pól uprawnych i możliwością efektywnego opracowania mikrofotometrycznego obrazów tych pól, jak również uwarunkowania wynikające z parametrów technicznych zastosowanych systemów wielospektralnych. Przeprowadzona łączna analiza wyżej wymienionych czynników

zadecydowała o wyborze zdjęć średnioskalowych (1 : 10 000 w przypadku mniejszego obiektu badawczego i systemu kamer Hasselblad; 1 : 20 000 w przypadku większego obiektu i kamery wielospektralnej NAC).

Kolejnym etapem pracy było określenie terminów wykonywania zdjęć lotniczych, w których może występować największe zróżnicowanie odbicia spektralnego badanych upraw. W wyniku konsultacji z pracownikami IHAR zostały ustalone przedziały czasowe, obejmujące główne fazy rozwojowe roślin zbożowych, tj. strzelanie w źdźbło, kłoszenie, dojrzałość mleczną i dojrzałość woskową oraz fazy intensywnego wzrostu roślin okopowych i kukurydzy. Terminy kalendarzowe odpowiadające powyższym fazom ustalono dla typowego przebiegu okresu wegetacyjnego; były one korygowane w przypadku opóźnienia wegetacji z powodu niekorzystnych warunków klimatycznych.

Opisane powyżej założenia metodyczne były podstawą praktycznej realizacji programu prac badawczych. W sezonie wegetacyjnym 1976 r. zostały wykonane 3 naloty, w dniach 24 czerwca, 7 lipca i 16 lipca; terminy wykonania zdjęć odpowiadały fazom kłoszenia, dojrzałości mlecznej i dojrzałości woskowej roślin zbożowych. W sezonie wegetacyjnym 1977 r. został wykonany jeden nalot, w dniu 10 czerwca, w fazie strzelania w źdźbło roślin zbożowych. Do wykonywania zdjęć lotniczych w latach 1976—1977 był wykorzystywany układ sprzężonych kamer fotograficznych Hasselblad, instalowany na pokładzie śmigłowca Mi-2.

Podstawowy materiał obserwacyjny stanowiły w omawianej pracy, ze względu na wielkość obiektu badawczego i ilość uzyskanych obserwacji, wielospektralne zdjęcia lotnicze wykonane w sezonie wegetacyjnym 1978 r. W tym to roku zostały wykonane 4 naloty, w dniach 7 czerwca, 22 czerwca, 28 lipca i 7 września. Terminy wykonania zdjęć odpowiadały fazom strzelania w źdźbło, kłoszenia i dojrzałości woskowej roślin zbożowych oraz fazie pełnej dojrzałości roślin okopowych i kukurydzy. W 1978 r. wykorzystywana była do rejestracji kamera wielospektralna NAC MB-470, zainstalowana na pokładzie samolotu AN-2.

W wyniku realizacji w/w programu fotografowania obiektów w latach 1976—1978 zostało wykonanych łącznie 8 serii obserwacyjnych obejmujących główne fazy rozwojowe badanych roślin uprawnych. Otrzymane materiały zdjęciowe zostały poddane standardowej obróbce fotochemicznej oraz usystematyzowane wg terminów wykonania zdjęć i wyciągów spektralnych w celu przygotowania ich do następnego etapu pracy — analizy mikrofotometrycznej.

Analiza mikrofotometryczna wielospektralnych zdjęć lotniczych

Mikrofotometryczna metoda interpretacji wielospektralnych zdjęć lotniczych opiera się na wykorzystaniu zależności między odbiciem

spektralnym obiektem a gęstością optyczną jego obrazu fotograficznego. Zależność ta jest zdeterminowana rodzajem systemu stosowanego do rejestracji promieniowania oraz zespołem warunków oświetlenia obiektu.

Do pomiaru gęstości optycznej, będącej miernikiem wielkości odbicia promieniowania, służą instrumenty pomiarowe zwane densytometrami. W omawianej pracy do opracowania materiałów zdjęciowych został wykorzystany mikrodensytometr angielskiej firmy Joyce-Loebl, model 3CS. Umożliwia on automatyczną rejestrację gęstości optycznej badanego materiału przezroczystego w postaci wykresów graficznych zapisywanych na stole kreślącym. Instrument ten działa na zasadzie dwustrumieniowego systemu optycznego, co zapewnia wysoką powtarzalność rejestracji. Zastosowany detektor — fotopowielacz steruje położeniem klina równoważenia gęstości optycznej, będącego wewnętrznym wzorcem pomiarowym, sprzężonego z urządzeniem piszącym, co umożliwia bezpośredni zapis wyrażany w jednostkach gęstości optycznej. Zakres mierzonych wartości, w zależności od zastosowanego klina wzorcowego szarości, wynosi od 0,8 do 3D. Efektywna szczelina pomiarowa może być zmieniana w przedziale $1,4 \times 0,2$ mm — $5,0 \times 1,0$ μ m, co zapewnia wysoką rozdzielczość skanowania.

Opisane powyżej urządzenie zostało wykorzystane do przeprowadzenia analizy mikrofotometrycznej wielospektralnych zdjęć lotniczych wykonanych w kolejnych fazach okresu wegetacyjnego. W pierwszej fazie tego etapu opracowania została wykonana wstępna analiza mająca na celu ustalenie minimalnej długości profilu mikrofotometrycznego, wystarczającej dla prawidłowego odczytania wartości gęstości optycznej. W tym celu zmikrofotometrowano fragmenty pól doświadczalnych reprezentujących wszystkie badane gatunki roślin, a następnie poddano ocenie wpływ struktury obiektu na przebieg mikrofotogramu, a co za tym idzie, na dokładność odczytu gęstości optycznej. W wyniku analizy przyjęto, iż minimalna długość profilu mikrofotometrycznego powinna wynosić 3 mm w skali zdjęcia.

W fazie przygotowawczej została również wykonana analiza mająca na celu określenie dokładności wyznaczania gęstości optycznej, wynikającej z powtarzalności działania instrumentu i błędów odczytu popełnianych przez obserwatora. W tym celu dokonano wielokrotnej rejestracji profili mikrofotometrycznych kilku fragmentów pól, następnie zaś były przeprowadzone kilkakrotne niezależne powtórzenia odczytów wartości gęstości optycznej przez 3 obserwatorów. W wyniku łącznej analizy wpływu czynników instrumentalnych i błędów osobowych został określony błąd średni pojedynczego odczytu. W omawianych badaniach, przy stosowaniu zakresu gęstości optycznej, wyznaczonego wzorcowym klinem szarości 3D, błąd ten wyniósł $\pm 0,03D$.

Po wykonaniu wstępnych analiz została przeprowadzona analiza mikrofotometryczna całego materiału zdjęciowego uzyskanego w wyniku kolejnych nalotów. Materiał ten stanowiły negatywy wyciągów spektralnych zarejestrowanych w 4 zakresach spektrum dla kolejnych faz rozwojowych roślin.

Po terenowym uczytelnieniu treści zdjęć dla każdego pola dokonano wielokrotnej rejestracji gęstości optycznej poszczególnych jego fragmentów. Liczba mikrofotogramów wahała się dla pojedynczego obiektu w granicach 3—20 w zależności od wielkości pola. Wykonanie wielu profili mikrofotometrycznych dla każdej jednostki agrarnej pozwoliło na uwzględnienie zmienności środowiskowej występującej w obrębie poszczególnych pól oraz na zebranie odpowiedniej ilości obserwacji do dalszego, statystycznego opracowania wyników analizy.

Metoda identyfikacji gatunków roślin uprawnych na podstawie ich charakterystyk spektralnego odbicia

Otrzymane w wyniku analizy mikrofotometrycznej wartości gęstości optycznej, będące miarami odbicia spektralnego badanych gatunków roślin, stanowiły materiał wyjściowy do przeprowadzenia analizy rozróżnialności i klasyfikacji upraw. Celem klasyfikacji było określenie stopnia rozpoznawalności poszczególnych gatunków roślin uprawnych w kolejnych stadiach ich okresu wegetacyjnego, zaś w konsekwencji próba wyznaczenia faz fenologicznych charakteryzujących się największym zróżnicowaniem odbicia spektralnego badanych gatunków roślin. Z tych względów proces klasyfikacyjny przeprowadzono oddzielnie dla każdego terminu rejestracji, a porównanie wyników określających stopień rozpoznawalności stanowiło podstawę do wnioskowania odnośnie najkorzystniejszej pory wykonywania zdjęć lotniczych dla identyfikacji badanych gatunków roślin.

W przedstawianej pracy został wykorzystany sposób klasyfikacji metodą pól testowych. Polega on na wyborze reprezentatywnej próby dla każdego gatunku roślin, określeniu wartości średniej odbicia spektralnego i jej odchylenia standardowego dla wszystkich prób badanych gatunków w 4 zakresach spektrum oraz zastosowaniu zespołu kryteriów klasyfikacyjnych, ustalających przynależność nowo wyznaczanego obszaru do określonej klasy, reprezentowanej wzorcem odbicia spektralnego. Opisana metoda klasyfikacji została wykorzystana w sposób następujący.

Dla każdego badanego gatunku wybrano w sposób losowy spośród całej populacji 10-elementową próbę stanowiącą reprezentację tego gatunku. Dla każdej próby (nazywanej odtąd wzorcem) obliczono średnie wartości odbicia spektralnego dla każdego z 4 zakresów spektrum oraz ich

odchylenia standardowe. Następnie dla każdego gatunku wyznaczono błąd różnicy wartości odbicia spektralnego rozpoznawanej próby pobranej z pola i wartości odbicia spektralnego wzorca wg wzoru

$$(m_{\Delta})_i = (m_w)_i \sqrt{n+1} \quad (2)$$

gdzie $(m_w)_i$ — odchylenie standardowe odbicia spektralnego i -tego wzorca,

n — liczba elementów wchodzących w skład wzorca.

Wielkości te były podstawowym elementem do zastosowania kryterium przyporządkowania każdej rozpoznawanej próby pobranej z pola do wzorca. Nowa obserwacja była utożsamiana z wzorcem, jeśli dla każdego wyciągu spektralnego spełniony był warunek

$$\Delta = |z_p - z_w| \leq |m_{\Delta}| t_a \quad (3)$$

gdzie z_p — wartość średnia odbicia spektralnego obszaru klasyfikowanego

z_w — wartość średnia odbicia spektralnego wzorca

wartość zmiennej t -Studenta odczytana z tablicy tego rozkładu dla poziomu istotności α i $l = n_w + n_p - 2$ stopni swobody.

W omawianym opracowaniu liczba stopni swobody wynosi $l = 9$, zaś spełnienie kryterium jest rozpatrywane na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Poziom taki jest najczęściej przyjmowany w statystycznej analizie obserwacji przyrodniczych o dużej zmienności cech badanych zjawisk. Na podstawie powyższych parametrów z tablic rozkładu t -Studenta została odczytana wartość $t_{0,05} = 2,26$, którą następnie wykorzystano do obliczenia wielkości $m_{\Delta} t_a$, stanowiących miary przynależności rozpoznawanej próby do określonego gatunku. W przypadku przyporządkowania próby do więcej niż jednego gatunku stosowane było dodatkowe, uściślające kryterium rozpoznawalności $\sum \Delta^2$ — minimum.

W oparciu o wyżej wymienione kryteria dokonano klasyfikacji wszystkich zaobserwowanych prób pobranych z pól. Została ona wykonana, po opracowaniu programu obliczeniowego, za pomocą kalkulatora programowanego „Compucorp”. Po zakończeniu etapu klasyfikacyjnego został określony stopień rozpoznawalności poszczególnych gatunków roślin uprawnych poprzez porównanie wyników klasyfikacji ze stanem rzeczywistym uzyskanym z rozpoznania terenowego. W wyniku porównania został określony procentowy udział prób prawidłowo sklasyfikowanych w stosunku do całkowitej liczby prób danego gatunku. Wyniki tej analizy zostały zamieszczone w tablicy 2.

faza I — faza strzelania w żdźbło,

faza II — faza kłoszenia,

Tablica 2

Nazwa uprawy	Rozpoznawalność w %			
	24. 06. 76 faza II	7.07.76 faza III	16.07.76 faza IV	10.06.77 faza I
Pszenica	92%	92%	88%	92%
Jęczmień	96%	89%	64%	100%
Rzepak				90%
Kukurydza			80%	
Buraki			100%	
Ziemniaki			100%	
	7.06.78 faza I	22.06.78 faza II	28.07.78 faza IV	7.09.78 faza V
Pszenica	78%	28%	81%	
Jęczmień	50%	56%	90%	
Rzepak	56%	44%		
Kukurydza			74%	45%
Buraki			58%	70%
Ziemniaki			89%	67%

faza III — faza dojrzałości mleczej,

faza IV — faza dojrzałości woskowej,

faza V — faza dojrzałości roślin okopowych i wykształcania się kolb kukurydzy.

Pierwszym, generalnym wnioskiem, wynikającym z przedstawionej tabeli jest stwierdzenie stosunkowo wysokiej rozpoznawalności upraw podczas okresu wegetacyjnego 1976 i 1977 r., w porównaniu z sezonem wegetacyjnym 1978 r. Fakt ten ma swoje uzasadnienie. Otóż do badań prowadzonych w latach 1976—1977 została wybrana stosunkowo niewielka liczba pól reprezentujących poszczególne gatunki roślin. Z tego względu próby pobrane do utworzenia wzorców odbicia spektralnego badanych upraw pochodziły z bezpośredniej bliskości obszaru klasyfikowanego. Zwartość obszaru badań i jego mała powierzchnia nie pozwoliły na uchwycenie zmienności przyrodniczej poszczególnych gatunków roślin, co w rezultacie wpłynęło na otrzymanie ich wysokiej rozpoznawalności. Z wyżej wymienionych względów wiarygodność wyników klasyfikacji danych z lat 1976—1977 należy oceniać z dużą ostrożnością.

Bardziej reprezentatywne są wyniki badań wykonanych w sezonie wegetacyjnym 1978 r., ze względu na wielkość i zróżnicowanie obiektu badawczego, co pozwoliło na uwzględnienie w procesie klasyfikacji zmienności przyrodniczej poszczególnych gatunków roślin. Fakt występowania tej zmienności w obrębie obiektu prac obniżył stopień rozpozna-

walności badanych upraw, zwłaszcza w fazie kłoszenia zbóż, kiedy to, zgodnie z obserwacjami terenowymi, zróżnicowanie osobnicze w ramach poszczególnych gatunków jest największe. Zjawisko to wystąpiło ze względu na poszerzenie przedziałów zmienności wzorców i częściowe nakładanie się klas o podobnych właściwościach spektralnych. Stwierdzenie słabej rozpoznawalności badanych gatunków roślin w w/w fazie rozwojowej ma jednakże istotne znaczenie praktyczne, stanowi bowiem przeciwwskazanie do wykonywania zdjęć lotniczych w tym okresie.

Z przedstawionej tabeli wynika, iż najlepszą rozpoznawalność badanych gatunków roślin można uzyskać w fazie dojrzałości woskowej zbóż, przypadającej w sezonie wegetacyjnym 1978 r. na II połowę lipca. Ze-stawienie wyników wskazuje jednakże na niejednakowy stopień rozpoznawalności, niezbyt wysoki w przypadku buraków cukrowych i kukurydzy. Fakt ten stanowił asumpt do dalszej analizy danych otrzymanych z pomiarów densytometrycznych pod kątem podniesienia dokładności rozpoznania. Postanowiono przeprowadzić szczegółową analizę rozróżnialności badanych gatunków roślin uprawnych w przeciągu okresu wegetacyjnego, oddzielnie dla każdej pary upraw i dla każdego wyciągu spektralnego. Celem wykonania tej analizy była próba określenia kombinacji zakresów spektrum, zapewniającej możliwie najlepszą rozpoznawalność badanych gatunków roślin, a w konsekwencji ewentualnego ograniczenia liczby stosowanych zakresów, jak również stwierdzenie prawidłowości wyznaczenia optymalnej pory fotografowania, określonej w wyniku opisanego procesu klasyfikacji.

Materiał wyjściowy do analizy rozróżnialności stanowiły wielkości gęstości optycznej wzorców, reprezentujące badane gatunki roślin. Analiza polegała na określeniu, dla każdej pary badanych gatunków, czy różnice wielkości odbicia spektralnego w każdym z czterech zakresów spektrum są istotne. Do wykonania powyższej analizy zgodnie z zasadami statystyki matematycznej został wykorzystany parametryczny test istotności dla dwóch średnich. Stosując ten test, dla każdej pary upraw oraz dla każdego zakresu spektrum zostały wyznaczone wartości liczbowe określające stopień istotności różnic odbicia spektralnego. Analizę taką przeprowadzono dla trzech poziomów istotności w celu wybrania zakresów spektrum, umożliwiających największe zróżnicowanie odbicia. Podsumowanie tej analizy zostało przedstawione w postaci tablicy zbiorczej (Nr 3). Zawiera ona informacje dotyczące faz rozwojowych i zakresów spektralnych najbardziej odpowiednich z punktu widzenia rozpoznawalności badanych zespołów roślinnych.

Faza I — strzelanie w źdźbło roślin zbożowych, koniec kwitnienia rzepaku,

Faza IV — faza dojrzałości woskowej roślin zbożowych, intensywnego

Tablica 3

Nazwa uprawy	Faza rozwoju	Zakresy spektrum
Pszenica—jęczmień	faza IV	zielony, czerwony podczerwony
Pszenica—rzepak	faza I	czerwony
Jęczmień—rzepak	faza I	czerwony
Pszenica—ziemniaki	faza IV	podczerwony
Pszenica—kukurydza	faza IV	podczerwony
Pszenica—buraki	faza IV	podczerwony
Jęczmień—ziemniaki	faza IV	czerwony, podczer- wony
Jęczmień—kukurydza	faza IV	zielony
Jęczmień—buraki	faza IV	czerwony
Kukurydza—ziemniaki	faza IV	podczerwony
Kukurydza—buraki	faza IV	zielony
Ziemniaki—buraki	faza IV	czerwony

rozwoju wegetatywnego roślin okopowych i wyrzucania wiech kukurydzy.

Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

1. Nie ma takiego okresu, w którym różnice spektralne pomiędzy wszystkimi badanymi uprawami przybierają jednocześnie maksymalne wartości, umożliwiające ich prawidłowe sklasyfikowanie na wielospektralnych zdjęciach lotniczych;

2. Najkorzystniejszym terminem rejestracji wielospektralnej do sklasyfikowania pszenicy, jęczmienia, buraków cukrowych, ziemniaków i kukurydzy jest II połowa lipca. W tym okresie rośliny zbożowe znajdują się zwykle w fazie dojrzałości woskowej, ziemniaki w fazie kwitnienia, buraki w okresie intensywnego rozwoju wegetatywnego, zaś kukurydza w fazie wyrzucania wiech. Dla uzyskania wysokiej rozpoznawalności wymienionych gatunków roślin należy stosować zielony, czerwony i podczerwony zakres spektrum;

3. Najodpowiedniejszym okresem do sklasyfikowania rzepaku jest I połowa czerwca (końcowa faza kwitnienia rzepaku). Wysoką rozpoznawalność tego gatunku można osiągnąć przy zastosowaniu czerwonego zakresu spektrum.

W celu potwierdzenia powyższych wniosków i zbadania wpływu ograniczania liczby wykorzystywanych zakresów na rozpoznawalność badanych gatunków roślin postanowiono dokonać powtórnej klasyfikacji prób pobranych z pól, przy zmniejszonej liczbie pasm spektralnych. Przy ograniczaniu liczby zakresów wykorzystano wnioski wynikające z zestawienia zbiorczego. Po przeprowadzeniu klasyfikacji określono procentowy

udział prób prawidłowo rozpoznanych w stosunku do pełnej liczby prób każdego gatunku. Wyniki tej klasyfikacji zostały zawarte w tablicy 4.

Tablica 4

Nazwa uprawy	Rozpoznawalność w %							
	Zakresy spektralne							
	N, Z, C, IR	Z, C, IR	Z, IR	C, IR	Z, C	Z	C	IR
Pszenica	81%	81%	93%	81%	76%	83%	71%	92%
Jęczmień	90%	90%	83%	90%	90%	80%	90%	43%
Kukurydza	74%	63%	67%	33%	74%	74%	30%	19%
Buraki	58%	67%	43%	54%	42%	25%	50%	50%
Ziemniaki	89%	89%	78%	89%	78%	56%	89%	89%

Analiza tablicy wykazuje, że zastosowanie pojedynczego wyciągu spektralnego, jak również kombinacji dwóch wyciągów do sklasyfikowania badanych gatunków roślin, nie zapewnia otrzymania dla wszystkich wymienionych gatunków rozpoznawalności uzyskiwanej w przypadku użycia pełnego zestawu wielospektralnego. Natomiast wykorzystanie do klasyfikacji trzech wyciągów spektralnych: zielonego, czerwonego i podczerwonego nie powoduje istotnych zmian stopnia rozpoznawalności poszczególnych gatunków roślin w porównaniu z rozpoznawalnością uzyskaną przy zastosowaniu czterech zakresów spektrum. Zestawienie to jest więc empirycznym potwierdzeniem wyników analizy rozróżnialności, zawartych w tablicy 3 i sformułowanych na ich podstawie wniosków dotyczących doboru najwłaściwszych zakresów spektrum.

Pominięcie niebieskiego wyciągu spektralnego w procesie prac interpretacyjno-obliczeniowych nie wpływa na obniżenie dokładności przeprowadzanej klasyfikacji. Wniosek ten ma podwójne znaczenie: poznawcze i praktyczne. Aspekt poznawczy polega na stwierdzeniu, iż w krótkofalowym zakresie promieniowania widzialnego istnieje stosunkowo niewielkie zróżnicowanie odbicia poszczególnych gatunków roślin. Do badań roślinności zakres ten nie jest więc najwłaściwszy. Wniosek dotyczący optymalnego doboru wyciągów spektralnych ma również znaczenie praktyczne. Wyeliminowanie w procesie opracowania materiałów zdjęciowych jednego zakresu spektralnego zmniejsza bowiem o 25% pracochłonność metody, przyczyniając się do szybszego otrzymania końcowych wyników klasyfikacji. Tym samym stwarza to warunki do przyspieszenia przekazywania pozyskiwanych teledetekcyjnie informacji zainteresowanym jednostkom, co ma niebagatelne znaczenie w przypadku określania struktury upraw.

Końcowy etap omawianej pracy stanowiła próba korelacji wniosków wynikających z analizy rozróżnialności upraw ze stanem przyrodniczym badanych gatunków roślin. Poszukiwane były zależności między zakresami spektrum, dającymi największe zróżnicowanie odbicia a fizyczno-fizjologicznymi cechami badanych roślin, charakterystycznymi dla kolejnych faz fenologicznych. W wyniku analizy dla większości badanych gatunków osiągnięto potwierdzenie wniosków dotyczących optymalnych zakresów spektralnych, rolniczymi informacjami naziemnymi określającymi stan rozwojowy roślin.

Podsumowując należy podkreślić, iż przedstawiona praca jest etapem prac badawczych zmierzających do utworzenia metodyki teledetekcyjnego rozpoznawania gatunków roślin uprawnych. Otrzymane wyniki dotyczące stopnia rozpoznania, jak również wnioski wpływające z analizy rozróżnialności upraw sugerują potrzebę kontynuowania badań w tym zakresie. Przyszłe prace badawcze powinny być skoncentrowane wokół problemu wpływu zmienności środowiskowej i odmianowej na dokładność rozpoznania badanych gatunków roślin. Powinny być również kontynuowane prace zmierzające do optymalizacji wyboru pasm spektralnych i okresów fotografowania pod kątem uzyskania maksymalnej rozróżnialności poszczególnych typów upraw. Należy także doskonalić metody opracowywania informacji wielospektralnych poprzez stosowanie odpowiednich systemów numerycznego przetwarzania danych. Dopiero takie kompleksowe prace badawcze umożliwią utworzenie wysoce wiarygodnej, teledetekcyjnej metody rozpoznawania upraw, przydatnej do reprezentacyjnych badań struktury rolniczego użytkowania ziemi.

ЗБИГНЕВ БОХЕНЕК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ АЭРОСНИМКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ НЕКОТОРЫХ СОРТОВ КУЛЬТИВИРОВАННЫХ РАСТЕНИЙ

Резюме

Работа представляет результаты проводимых до сих пор исследований по выработке метода дистанционного распознавания сортов культивированных растений с помощью техники многозональной фотографии.

В первой части работы подробно характеризуется система получения многозональных снимков, а также представлены результаты исследований спектрорадиометрического качества применяемых камер и фильтров. Рассмотрено также влияние условий освещения на характер регистрируемого излучения, с предоставлением практических выводов, касающихся способа регистрации с учетом влияния изменений освещения.

Во второй части работы характеризуется объект исследовательских работ

и методические указания, а также представлена кратко реализация программы исследований, связанная с выполнением аэросъемки. Затем изложены принципы микрофотометрического анализа многозональных аэроснимков и способов его проведения для полученных съемочных материалов.

В третьей части работы представлен метод классификации сортов возделываемых культур на основе их спектральных характеристик отражения, опираясь на исследование принципов математической статистики.

После изложения результатов классификации и проведения подробного анализа различимости культур в течение вегетационного периода были представлены выводы, касающиеся подробно спектральных поясов и периодов фотографирования наиболее подходящих с точки зрения различимости исследуемых сортов культивируемых растений.

Перевод: Róża Tolstikowa

ZBIGNIEW BOCHENEK

UTILIZATION OF AERIAL MULTISPECTRAL PHOTOGRAPHS FOR CLASSIFICATION OF SOME TYPES OF CROPS

Summary

The results of existing studies on elaboration of method for the remote recognition of crop types, with the use of multispectral aerial photographs, are discussed in this work.

In the first part of work, the system of acquisition of multispectral photographs and the results of studies of spectroradiometric quality of filters and cameras applied, are described in details. The influence of the illumination conditions on the characteristics of registered radiation is also discussed, and the practical conclusions concerning the registration method, including the influence of illumination changes, are suggested.

In the second part of presented work, the object and methodological assumptions are characterized and the realization of research programme concerning the acquisition of aerial photographs are shortly presented. The rules of microphotometric analysis of the aerial photographs and the way of carrying it out are then discussed.

In the third part of work, the method for classification of crop types on the base of spectral reflectance characteristics, with the use of mathematical statistical rules, is proposed. After the presentation of classification results and completion of the detailed analysis of crop discrimination during the vegetation process, the conclusions were drawn, concerning the choice of spectral bands and periods of taking photographs, the most appropriate for the ability of distinguishing the examined types of crops.

Translation: Jacek Domański

SPIS TREŚCI

GRZEGORZ RUDOWSKI

Wpływ struktury obiektów i konstrukcji urządzeń pomiarowych na odwzorowanie termalne 3

MIECZYŚLAW SMÓŁKA

Koncepcja rozwiązania układu geometrycznego i kinematycznego teodolitu 71

ZBIGNIEW BOCHENEK

Wykorzystanie wielospektralnych zdjęć lotniczych do klasyfikacji niektórych gatunków roślin uprawnych 91

СОДЕРЖАНИЕ

ГЖЕГОЖ РУДОВСКИ

Влияние элементов наблюдаемого ландшафта и конструкции измерительных устройств на тепловое изображение объектов 68

МЕЧИСЛАВ СМЎЛКА

Концепция решения геометрической и кинематической системы теодолита 89

ЗВИГНЕВ БОХЕНЕК

Использование многозональных аэроснимков для классификации некоторых сортов культивируемых растений 105

CONTENTS

GRZEGORZ RUDOWSKI

The influence of structure of observed objects and construction of measurement devices on the thermal imagery 69

MIECZYŚLAW SMÓŁKA

Concept for the solution of geometric and kinematic system of a theodolite 90

ZBIGNIEW BOCHENEK

Utilization of aerial multispectral photographs for classification of some types of crops 106

