

JOZEF SANECKI

Wojskowa Akademia Techniczna
Warszawa

ZDALNE BADANIE ŚRODOWISKA GEOGRAFICZNEGO ZA POMOCĄ SPEKTROFOTOMETRU

ISTOTA SPEKTROFOTOMETROWANIA

Spektrofotometria jako określona metoda wyjaśniania pewnych zjawisk fizycznych jest obecnie rozległą dziedziną wiedzy, wykorzystującą właściwości badanych próbek do spowodowania spektralnego rozkładu użytego promieniowania elektromagnetycznego w bardzo szerokim zakresie widma. Możemy więc mówić o spektrografowaniu na przykład w ultrafiolecie, w świetle widzialnym, podczerwieni fotograficznej itp.

Z punktu widzenia zdalnego badania środowiska chodzi tylko o te zakresy promieniowania elektromagnetycznego, które przenoszone są z małym tłumieniem w takim ośrodku, jakim jest powietrze, oraz w takich zakresach, które mogą być rejestrowane przez istniejące obecnie detektory tego zakresu promieniowania. Ponieważ opracowanie wykonane jest pod kątem prowadzenia detekcji w zakresie fotograficznym, dalsze rozważania zostaną ograniczone do tego wycinka. W przypadku potrzeb zdalnej detekcji możemy głównie mówić o spektrofotometrycznym badaniu takich właściwości elementów środowiska, jak: właściwości reemisyjne, emisyjne i absorpcyjne. Biorąc pod uwagę ośrodek przenoszenia informacji i aparatury, właściwościami tymi będą: transmisja, reemisja i absorpcja. Po między wymienionymi właściwościami badanych elementów istnieje ściśle zależność wynikająca z zasady zachowania energii. Tak na przykład rozpatrując rozkład spektralny reemisji $R(\lambda)$ nieprzezroczystej i nie emitującej próbki, definiujemy automatycznie rozkład spektralny absorpcji $A(\lambda)$, która stanowi dopełnienie do 100% właściwości reemisyjnej. W przypadku badania próbki częściowo przepuszczającej promieniowanie elektromagnetyczne analizie poddawane są rozkłady spektralne reemisji $R(\lambda)$,

absorpcji $A(\lambda)$ oraz transmisji $T(\lambda)$. Również tutaj suma tych składowych musi stanowić 100%.

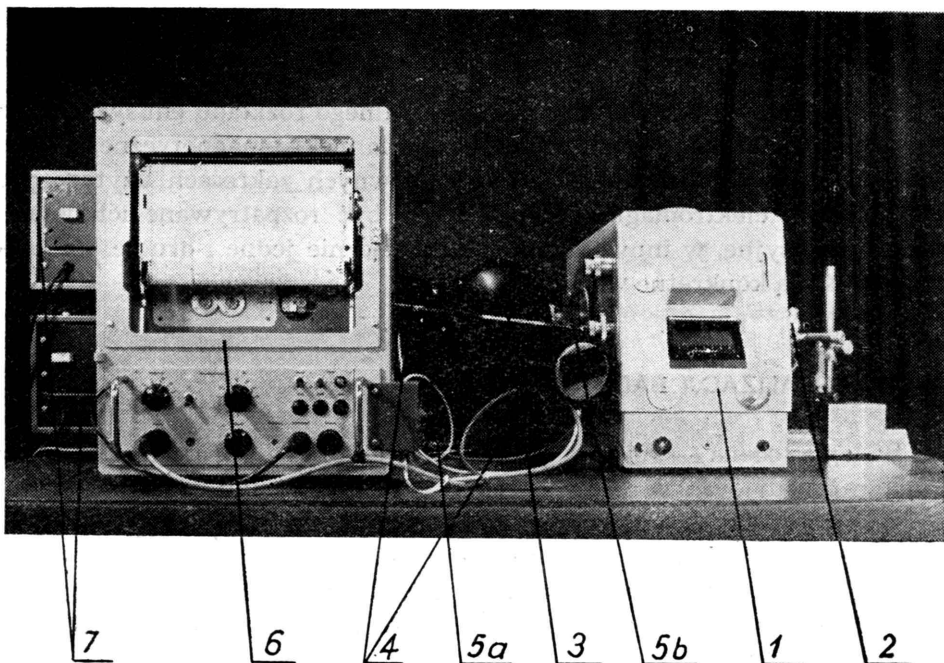
W omawianym zakresie badania spektralnego rozkładu emisyjności dotyczą głównie źródeł energii promieniowania elektromagnetycznego, które także podlegają spektrografowaniu. W pewnych zakresach użytego promieniowania elektromagnetycznego mogą być rozpatrywane ich właściwości reemisyjne, w innych emisyjne lub łącznie jedne i drugie. Cel analizy określają konkretne warunki.

SPOSÓB REALIZACJI BADAŃ

Badania (ocena — rejestracja) przeprowadzamy za pomocą wielu przyrządów pracujących w różnych zakresach długości fali oraz na zupełnie różnych zasadach. Źródła promieniowania monochromatycznego są wspólne dla wszystkich spektrofotometrów; będą one różne na przykład w spektrofotometrach do badania promieniowania α , β , promieniowania widzialnego czy radiolokacyjnego. Nie można sobie wyobrazić realizacji wiązki monochromatycznej przy użyciu jednego przyrządu.

Podobnie jak poprzednio, rozważania ograniczymy tylko do zakresu fotograficznego, zawężonego jeszcze do promieniowania elektromagnetycznego przechodzącego na znaczne odległości w atmosferze. Mieści się w nim bliski ultrafiolet, promieniowanie widzialne i bliska podczerwień. Promieniowanie widzialne może być analizowane za pomocą spektrofotometru subiektywnego z wykorzystaniem wzorców oraz oka jako detektora lub obiektywnie — z użyciem elementów fotoczułych, zaś pozostałe zakresy tylko metodami obiektywnymi. Spośród tych możemy wymienić metody z fotograficzną oraz elektroniczną rejestracją wyników. Tak jeden, jak i drugi sposób ma swoje zalety i wady. W metodzie fotograficznej podstawową zaletą jest natychmiastowa rejestracja widma, istotna szczególnie w przypadku analizy procesów zachodzących dynamicznie; jej wadą jest konieczność dokonania dodatkowego, nieraz skomplikowanego, procesu odczytywania wyników, szczególnie gdy zachodzi potrzeba oceny amplitudy analizowanego widma. Metodą rejestracji wyników z wykorzystaniem urządzeń elektronicznych można otrzymać ocenę rozkładu spektralnego od razu w formie czytelnej, zarówno pod względem zakresu długości fali, jak i amplitudy. Uzyskiwanie jednak rozkładu widmowego tą metodą trwa dłużej, a tym samym badanie procesów o dużej zmienności w czasie jest znacznie utrudnione.

Na fot. 1 przedstawiono zestawiony z oddzielnych elementów spektrofotometr przeznaczony do badania spektralnego rozkładu właściwości reemisyjnych, absorpcyjnych i transmisyjnych próbek. Przyrząd pozwala prowadzić badania w zakresie $0,360 \mu\text{m}$ — $1,300 \mu\text{m}$ przy 40 mm średnicy próbki w przypadku badania reemisji i absorpcji oraz 25 mm przy bada-



Fot. 1. Spektrofotometr: 1 — monochromator, 2 — źródło światła, 3 — kula Ulbrichta, 4 — fotopowielacze, 5 — pojemniki na próbkę do badania: a — reemisji i absorpcji, b — transmisji 6 — rejestrator wyników, 7 — zasilacze fotopowielaczy

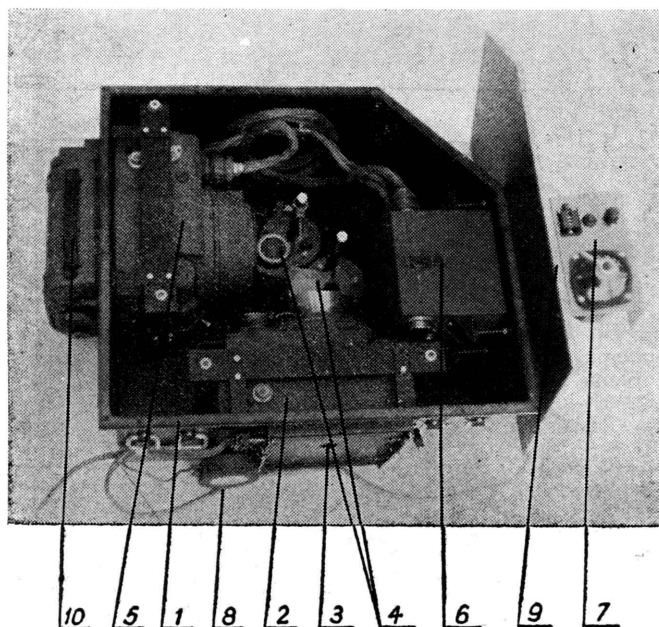
niu transmisji. Ustawienie długości fali i przesuwu taśmy odbywa się automatycznie. Może on być również użyty jako urządzenie rejestrujące transmisję lub gęstość optyczną dowolnych próbek barwnych lub achromatycznych.

ZDALNE SPEKTROFOTOMETROWANIE

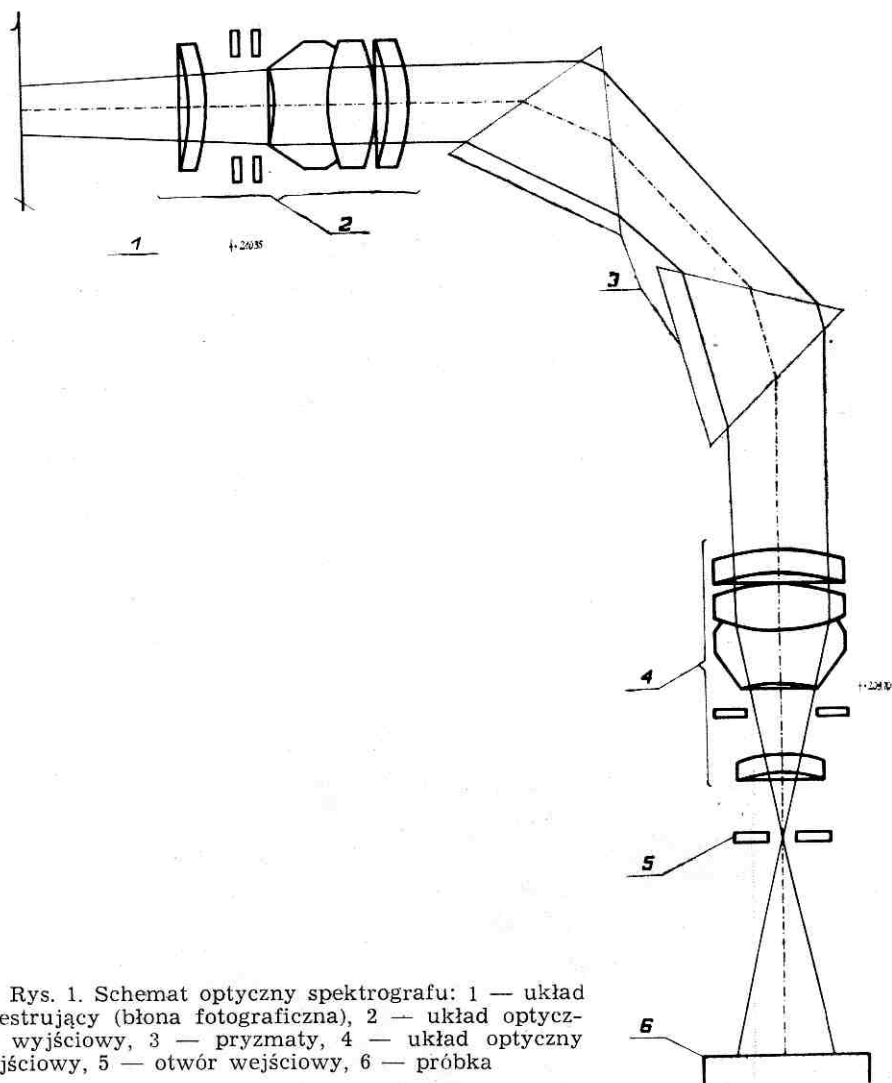
Nie zawsze można realizować badanie spektralnego rozkładu właściwości reemisyjnych czy emisyjnych laboratoryjnie. W przypadku Słońca czy gwiazd nie ma możliwości zastosowania „próbek”; wówczas konieczne jest posiadanie wielu dodatkowych urządzeń pomocniczych. Trudno także wyobrazić sobie realizację badania właściwości reemisyjnych lasów, pól uprawnych itp., czyli dużych obiektów, których pojedyncze części (na przykład liście) nie są reprezentatywne dla całego obszaru. Do tego celu niezbędne jest urządzenie, które jak gdyby scałkuje i uśredni właściwości reemisyjne na pewnym obszarze. W przypadku lasów lub upraw rolnych będą to właściwości reemisyjne liści ustawionych pod różnymi kątami względem źródła światła i detektora, gruntu — podłoża, pośrednio także istniejących w środowisku stosunków wodnych, nawożenia

i innych czynników niemożliwych do uchwycenia podczas badania na przykład pojedynczych liści, gruntów itp.

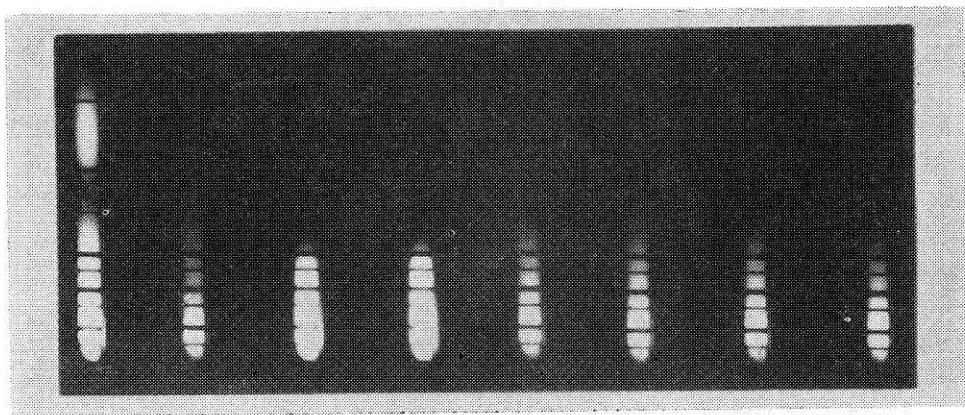
Aby uśrednienie było w miarę reprezentatywne dla pewnego obszaru zależnie od struktury pokrycia, musi być on duży, a tym samym spektrogram winien być wykonany z odpowiedniej odległości. W celu przeprowadzenia zdalnego spektrografowania skonstruowano przyrząd pokazany na fot. 2, umownie nazwany aerospektrofotometrem. Na rys. 1 przedstawiono schemat optyczny aerospektrofotometru. Pozwala on na rejestrację widma w zakresie 380 nm—950 nm. Wyniki spektrografowania zestawiono na fot. 3. Rozkład spektralny fotografowany jest na materiale światłoczułym, wrażliwym na podczerwień. Zależnie od czułości spektralnej użytego materiału długość fotografowanego spektrum wynosi około 5 cm. Spektrografowanie może się odbywać z wysokości 0 km—10 km, przy szybkości lotu 0—1200 km/godz., z częstotliwością: 1 rozkład spektralny na 2 sek. Lotniczy aparat fotograficzny zapewnia automatyczną regulację przysłony i czasu naświetlania zależnie od warunków oświetleniowych oraz kompensację poruszenia w zależności od parametrów lotu samolotu.



Fot. 2. Aerospektrofotometr: 1 — obudowa, 2 — kondensator, 3 — diafragma, 4 — układ pryzmatów, 5 — aparat fotograficzny do rejestracji widma, 6 — urządzenie sterujące pracą aparatu fotograficznego, 7 — urządzenie sterujące pracą spektrofotometru, 8 — fotokomórka sterująca ilością światła, 9 — pokrywa, 10 — kasetta



Rys. 1. Schemat optyczny spektrografu: 1 — układ rejestrujący (błona fotograficzna), 2 — układ optyczny wyjściowy, 3 — pryzmaty, 4 — układ optyczny wejściowy, 5 — otwór wejściowy, 6 — próbka



Fot. 3. Spektrogramy gruntów zarejestrowane na materiale światłoczułym uczulonym na podczerwień

ODCZYTYWANIE WYNIKÓW

Rejestracja wyników metodą fotograficzną umożliwia otrzymanie rozkładu gęstości optycznej (D) w zależności od długości fali $D(\lambda)$. Odczytywanie gęstości optycznej za pomocą mikrofotometru czy spektrofotometru jest podobne: rejestrujemy transmisję (T), a nie gęstość optyczną. Zależność między gęstością optyczną a transmisją można wyrazić następująco:

$$T(\lambda) = 10^{-D(\lambda)}, \quad (1)$$

lub

$$D(\lambda) = -\lg T(\lambda).$$

Jak z wzorów wynika, przy gęstości optycznej $D=0$ $T=1$, a dla $D=1$ $T=0,1$. Tak więc przyrostowi gęstości optycznej od 0 do 1 towarzyszy spadek transmisji o 90%, natomiast dla $D=2$ $T=0,01$, czyli przyrostowi gęstości optycznej od 1 do 2 towarzyszy spadek transmisji o 99%. Jeszcze niekorzystniej sytuacja przedstawia się w przypadku gęstości optycznej powyżej 2, gdzie przyrostowi gęstości od 2 do ∞ towarzyszy spadek transmisji tylko o 1%. Z rozumowania tego wynika, że dokładność pomiarów przy dużych gęstościach optycznych jest minimalna. Zależność gęstości optycznej od długości fali można przedstawić w następującej postaci:

$$D(\lambda) = f(\lambda) \log [t E(\lambda) R(\lambda) d(\lambda) T_u(\lambda)], \quad (2)$$

gdzie:

- $D(\lambda)$ — gęstość optyczna spektrogramu,
- $f(\lambda)$ — kontrastowość materiału fotograficznego,
- t — czas trwania ekspozycji,
- $E(\lambda)$ — spektralny rozkład źródła światła,
- $R(\lambda)$ — właściwości reemisyjne próbki,
- $d(\lambda)$ — spektralna czułość materiału fotograficznego,
- $T_u(\lambda)$ — spektralny rozkład transmisji układu optycznego oraz ośrodka przenoszenia informacji.

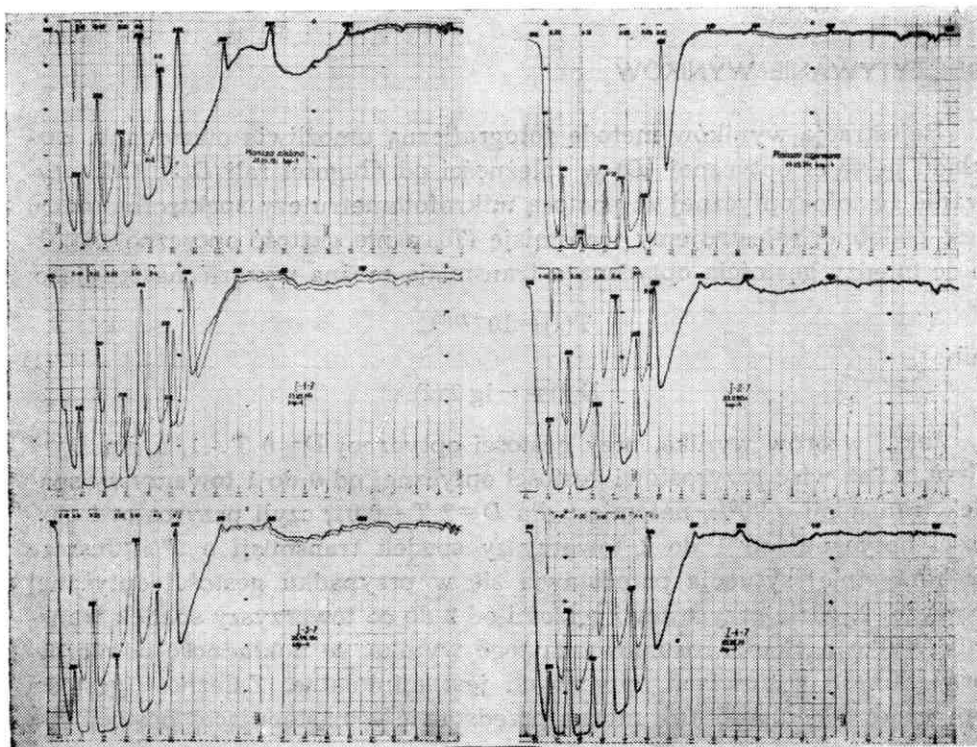
Na podstawie wzoru (2) można powiedzieć, że zadanie ustalenia wartości $R(\lambda)$, mając $D(\lambda)$, jest kłopotliwe. Po przekształceniu wzoru (1) ze względu na $R(\lambda)$ oraz wprowadzeniu wzoru (2) i przyjęciu, że $t=1$, możemy otrzymać następujące wyrażenie zależności reemisji od długości fali $R(\lambda)$:

$$R(\lambda) = \left\{ T [(\lambda)] \frac{1}{f(\lambda)} E(\lambda) d(\lambda) T_u(\lambda) \right\}^{-1} \quad (3)$$

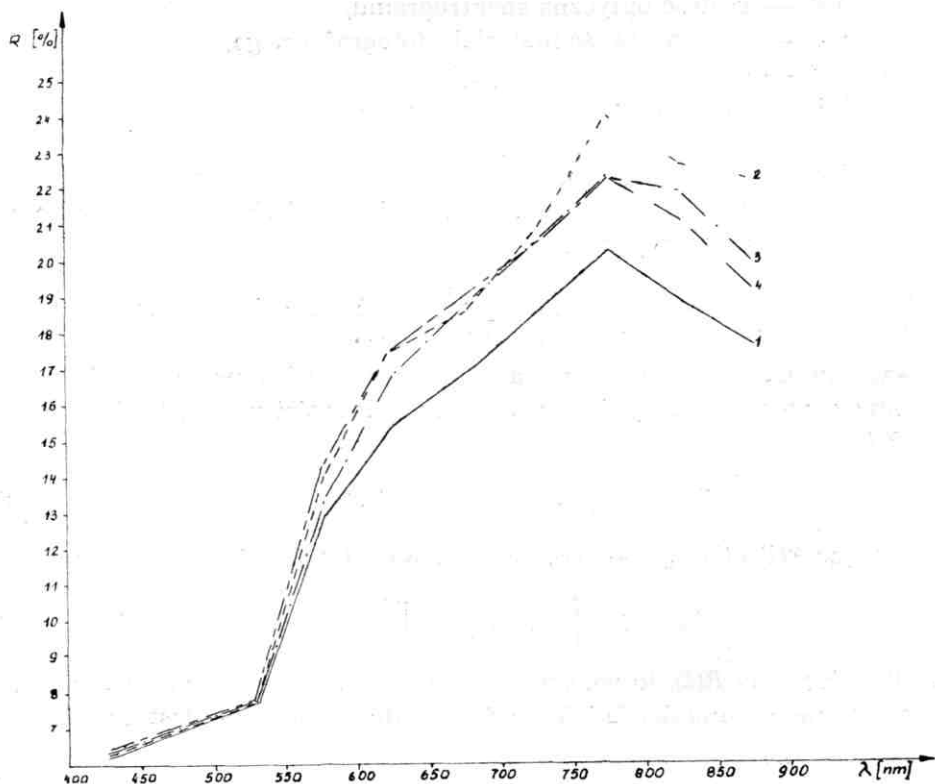
Oznaczając $E(\lambda) d(\lambda) T_u(\lambda) = B(\lambda)$, możemy wzór (3) przedstawić prościej:

$$R(\lambda) = \left[\frac{f(\lambda)}{\sqrt{T(\lambda)}} B(\lambda) \right]^{-1} \quad (4)$$

Jeżeli zmierzmy $R(\lambda)$, to we wzorze (4) uzyskamy dwie niewiadome, obydwie zależne od długości fali $B(\lambda)$ i $f(\lambda)$. Dlatego konieczne jest do ich wy-



Fot. 4. Spektrogramy gruntów i plansz — testów z fot. 3, odczytane za pomocą mikrofotometru



Rys. 2. Wielkości reemisji pospółki o wilgotności względnej 3% i różnym zagęszczeniu: 1 — zagęszczenie najmniejsze, 2, 3 — zagęszczenie pośrednie, 4 — zagęszczenie największe

znaczenia posiadanie dwóch testów*. Wyznaczenie zależności $f(\lambda)$ oraz $B(\lambda)$ umożliwi przeliczenie każdej wartości $T(\lambda)$ na $R(\lambda)$ dla danych warunków reprezentowanych przez $B(\lambda)$ i dla materiału fotograficznego reprezentowanego we wzorze (4) przez $f(\lambda)$. Na fot. 3 przedstawiono spektrogram próbki gruntu, z którego sześć rozkładów spektralnych odczytano na mikrofotometrze, uzyskując wykresy zamieszczone na fot. 4. Ponieważ wartość transmisji $T(\lambda)$ odczytano za pomocą mikrofotometru, posiada ona małą rozpiętość w dolnej części wykresu. W punktach oznaczonych K2, K4, K10 i K20 zastosowano kompensację, przyjmując małą wartość transmisji za odpowiednio wyższy poziom na wykresie. Duże wartości transmisji na wykresie reprezentują zaznaczone długości fali. Przeliczony według wzoru (4) wykres z fot. 4 pokazuje rys. 2.

ZASTOSOWANIE WYNIKÓW SPEKTROFOTOMETROWANIA

Spektrofotometr skonstruowano z myślą o prowadzonych aktualnie pracach nad techniką wielopasmową z użyciem ETO do analizowania obrazu, a szczególnie jej pasm z zakresu fotograficznego. Rejestracja fotograficzna właściwości reemisyjnych elementów terenu przebiega według wzoru (2). Z przytoczonego wzoru widać, że poszczególne jego parametry są dość trudne do dokładnego opisu. Dlatego, znając charakterystykę spektralną uzyskaną za pomocą spektrofotometru, możemy do pamięci EMC wprowadzić od razu $D(\lambda)$ według wzoru (2), a nie $R(\lambda)$ uzyskane metodą laboratoryjną. Podając do pamięci maszyny cyfrowej funkcję $D(\lambda)$, eliminujemy wiele błędów wynikłych w czasie obliczania parametrów wzoru (2).

Dodatkowym czynnikiem przemawiającym na korzyść tej metody jest fakt użycia jednego — maksimum dwóch — detektorów oraz prowadzenia obróbki fotograficznej w tych samych warunkach. Może ona być stosowana także do wielu innych przedsięwzięć, na przykład do ustalenia optymalnych filtrów celem wyróżnienia większej liczby elementów tła, do badania spektralnych czułości światłoczułych materiałów barwnych i czarno-białych, do doboru odpowiednich zabarwień pokryw maskujących itp. Metoda zdalnego uzyskiwania rozkładu spektralnego może być również zastosowana do badań zanieczyszczenia środowiska i wielu innych zjawisk fizykochemicznych mających wpływ na zmianę wartości rozkładu spektralnego, własności reemisyjnych, absorpcyjnych, emisyjnych i transmisyjnych.

* Przytoczone rozumowanie zakłada, że proces rejestracji rozkładu spektralnego odbywał się na prostoliniowym odcinku krzywej charakterystycznej użytego materiału światłoczułego. Wyjście w czasie rejestracji z odcinka prostoliniowego wymaga posiadania więcej testów oraz bardziej skomplikowanych obliczeń.

JÓZEF SANECKI

**REMOTE SENSING OF A GEOGRAPHICAL ENVIRONMENT WITH
THE USE OF A SPECTROMETER**

S u m m a r y

The essential characteristic of spectrophotometry are discussed, considering the problem from the physical angle. A method is presented for spectrophotometric measurements in the laboratory or on a remote basis. Equipment for carrying out laboratory investigations and for remote investigations from an aircraft are described. A method is given for conversion of the remote recorded spectrograms on to light-sensitive material. Also included are photographs of the instruments used and certain of the research results obtained.

JÓZEF SANECKI

**LA TÉLÉDÉTECTION DU MILIEU GÉOGRAPHIQUE AU MOYEN
DU SPECTROMÈTRE**

R é s u m é

Dans l'article on a discuté le problème de la spectrophotométrie en le traitant du côté physique. On a présenté la façon de la réalisation de spectrophométrie au laboratoire et à distance. On a présenté l'appareillage pour les essais de laboratoire et du bord de l'avion. On a donné la méthode de calcul des spectrogrammes enregistrés à distance sur le matériel photosensible. Dans l'article on a inséré les photos des appareils utilisés ainsi que quelques résultats des essais.