

ANDRZEJ CIOLKOSZ

## **Teledetekcja satelitarna źródłem informacji o obiektach, zjawiskach i procesach zachodzących na Ziemi**

### **Wstęp**

Zbliża się pięćdziesiąta rocznica wprowadzenia na orbitę pierwszego sztucznego satelity Ziemi. Od tego wydarzenia na orbitach wokółziemskich umieszczono wiele tysięcy różnych satelitów, z których tylko nieznaczna część była przeznaczona do obserwacji powierzchni naszego globu i zbierania danych o środowisku. Informacje pozyskane za pomocą tych satelitów okazały się jednak wielce przydatne nie tylko dla nauki, ale znalazły także praktyczne zastosowania. To skłoniło kraje dysponujące techniką kosmiczną do powołania wielu specjalnych programów w celu zdobywania informacji z kosmosu o obiektach, zjawiskach i procesach, jakie zachodzą na Ziemi. Wiele spośród tych informacji okazało się nie tylko niezmiernie interesujących, ale niemożliwych do pozyskania żadnymi innymi metodami.

Metody pozyskiwania danych za pomocą urządzeń umieszczonych na satelitach noszą nazwę teledetekcji. Pod tym pojęciem rozumie się dziś nie tylko pozyskiwanie danych nie będących w bezpośrednim (fizycznym) kontakcie z badanym obiektem, ale także przetwarzanie pozyskanych danych w użyteczne informacje, charakteryzujące poszczególne obiekty, zjawiska oraz procesy zachodzące na powierzchni globu ziemskiego.

Mimo że w pozyskiwaniu danych wykorzystuje się wiele zjawisk, przede wszystkim promieniowanie elektromagnetyczne, a także pole magnetyczne, grawitacyjne, fale akustyczne oraz promieniotwórczość, to jednak powszechnie pod pojęciem „teledetekcja” rozumie się zwykle metody, które wykorzystują promieniowanie elektromagnetyczne (światło, ciepło, promieniowanie mikrofalowe) jako nośnik informacji o obiektach i ich charakterystyce. Tak więc pomiary magnetyczne, grawitacyjne, elektryczne, a także pomiary radioaktywności, szeroko prowadzone z pokładów samolotów i satelitów, uważa się raczej za badania geofizyczne prowadzone z powietrza lub z wysokości orbitalnych niż za teledetekcję.

Nie wszystkie długości fal emitowanych przez Słońce docierają do powierzchni Ziemi, gdyż są one pochłaniane przez występującą w atmosferze parę wodną, dwutlenek

węgla i ozon. Ten wpływ atmosfery na transmisję promieniowania sprawia, że w teledetekcji wykorzystuje się tylko tzw. okna atmosferyczne, czyli te zakresy widma, które bez większych przeszkód przechodzą przez atmosferę. Takie okna tworzą: promieniowanie widzialne, krótkofalowe promieniowanie podczerwone, podczerwień długofalowa (termalna), a także promieniowanie mikrofalowe, dla którego atmosfera ziemską jest niemal przezroczysta. Promieniowanie elektromagnetyczne, docierające od Słońca do powierzchni Ziemi, jest od niej odbijane lub pochłaniane, a następnie emitowane w postaci długofalowego promieniowania podczerwonego. Zarówno promieniowanie odbite, jak też emitowane są rejestrowane za pomocą specjalnych detektorów umieszczonych na samolotach lub satelitach.

### **Rozwój techniki aerokosmicznej**

Rozwój metod zdalnego pozyskiwania danych rozpoczął się wraz z rozwojem lotnictwa. W 1903 r. miał miejsce pierwszy lot samolotu skonstruowanego przez braci Wright. W sześć lat później Wilbur Wright wykonał w pobliżu Rzymu pierwsze zdjęcie lotnicze, zapoczątkowując tym samym trwającą do dziś erę fotografii lotniczej. Szybki rozwój techniki lotniczej doprowadził do skonstruowania pojazdów zdolnych pokonać grawitację ziemską i wznieść się na wysokości orbitalne. Dzień 12 października 1957 r. zapisał się w historii ludzkości jako ten, w którym pierwszy sztuczny satelita – sputnik znalazł się na orbicie wokółziemskiej. Dał on początek rozwojowi techniki kosmicznej, który dziś wyraża się m.in. wprowadzeniem na orbity niemal dziesięciu tysięcy różnych satelitów. Większość z nich, zwłaszcza w pierwszym okresie ery satelitarnej, to satelity o przeznaczeniu militarnym.

Za początek teledetekcji satelitarnej można przyjąć marzec 1946 r., kiedy to z poligonu doświadczalnego White Sands w stanie Nowy Meksyk w USA została wystrzelona rakietą V-2. Osiągnęła ona wysokość 120 km. Na jej pokładzie zainstalowano kamerę fotograficzną, za pomocą której wykonano pierwsze zdjęcia powierzchni Ziemi z wysokości przekraczającej 100 km, przyjętej umownie za próg przestrzeni kosmicznej. Na kolejne zdjęcia z przestrzeni kosmicznej trzeba było czekać do 1960 r. W tym to bowiem roku zostały rozpoczęte dwa programy pozyskiwania zdjęć satelitarnych: wojskowy, znany po latach pod nazwą Corona i cywilny – TIROS.

Pierwsze zdjęcia wykonane w ramach programu TIROS były przeznaczone dla celów meteorologii. Charakteryzowały się one małą rozdzielczością przestrzenną, co sprawiało, że były na nich odwzorowane obiekty o wielkości około 1 km. Ta rozdzielczość zdjęć była stanowczo niewystarczająca do badań środowiska, ale zupełnie satysfakcjonowała meteorologów, zwłaszcza synoptyków. Już w pierwszym okresie dostarczania zdjęć przez satelity TIROS stwierdzono, że w znacznym stopniu ułatwiają one sporządzanie prognoz meteorologicznych, szczególnie krótkoterminowych.

Dalszy rozwój techniki pozyskiwania zdjęć satelitarnych zmierzał z jednej strony, w kierunku opracowania urządzeń zdolnych wykonywać zdjęcia o większej rozdzielczości przestrzennej, z drugiej zaś, w kierunku ich przesyłania do naziemnych stacji odbiorczych drogą radiową. Ukoronowaniem tych dążeń było wprowadzenie na orbitę wokółziemską 23 lipca 1972 r. pierwszego operacyjnego satelity środowiskowego Landsat-1, przeznaczonego do badania zasobów naturalnych Ziemi. Skaner umieszczony na pokładzie tego satelity wykonywał zdjęcia w czterech zakresach widma, obejmujących część promieniowania widzialnego i część bliskiej podczerwieni. Zdjęcia charakteryzowały się 80-metrową rozdzielczością przestrzenną. Niemal od pierwszej chwili wywołały one ogromnie zainteresowanie badaczy i znalazły szerokie zastosowanie w badaniach różnych komponentów środowiska.

Po trzech latach pracy na orbicie Landsat-1 został zastąpiony kolejnym satelitą. Obecnie już siódmy satelita tej serii dostarcza zdjęć o znacznie udoskonalonej charakterystyce. Przez prawie 14 lat satelity Landsat były jedynymi satelitami środowiskowymi. Wykonały one ogromną liczbę zdjęć niemal całego globu ziemskiego. Tylko obszary wokółbiegunowe nie były przez nie obrazowane. W 1986 r. został wystrzelony francuski satelita środowiskowy – SPOT, dając początek kolejnej serii satelitów przeznaczonych do pozyskiwania informacji o obiektach i zjawiskach zachodzących na powierzchni Ziemi. Zdjęcia wykonywane przez satelity SPOT pozwalały na otrzymanie trójwymiarowego modelu terenu, co wpłynęło na ułatwienie ich interpretacji.

Od chwili wystrzelenia pierwszego satelity przeznaczonego do operacyjnego wykonywania zdjęć powierzchni globu ziemskiego minęły trzydzieści trzy lata. W tym okresie umieszczono na orbitach wiele satelitów przeznaczonych do pozyskiwania różnych informacji o powierzchni terenu, morzach i oceanach, jak również o atmosferze i zachodzących w niej zjawiskach. Tylko część tych informacji ma charakter zdjęć, wiele innych to dane nieobrazowe, które dopiero po przetworzeniu można przedstawić w postaci map tematycznych, jeszcze inne to dane wykorzystywane w opracowaniach modeli różnych zjawisk i procesów.

### **Charakterystyka zdjęć satelitarnych**

Zdjęcia satelitarne różnią się między sobą rozdzielczością przestrzenną, spektralną, radiometryczną i czasową. Najbardziej zauważalną cechą zdjęć jest ich rozdzielczość przestrzenna, ona bowiem decyduje o wielkości obiektów, które można dostrzec na zdjęciu. Landsat-1 wykonywał zdjęcia, których rozdzielczość przestrzenna wynosiła, jak już wspomniano, 80 m. Na wykonywanych przez niego zdjęciach można było dostrzec obiekty, które w rzeczywistości miały rozmiary przynajmniej  $80 \times 80$  m, czyli powierzchnię  $6\,400\text{ m}^2$ . Rozdzielczość zdjęć wykonywanych przez satelity SPOT była już zdecydowanie wyższa. Wynosiła ona, w zależności od sposobu rejestracji promieniowania,

10 lub 20 m. Obecnie zdjęcia wykonywane przez satelity cywilne mają rozdzielczość przestrzenną poniżej 1 m, a więc porównywalną z rozdzielczością zdjęć lotniczych, wykonywanych z nieporównanie mniejszych wysokości.

Rozdzielczość spektralna to liczba rejestrowanych zakresów promieniowania. Jeżeli znów posłużymy się przykładem pierwszego satelity środowiskowego, to należy wspomnieć, że umieszczony na jego pokładzie skaner MSS wykonywał zdjęcia w czterech zakresach widma. Kolejne satelity były wyposażane w skanery rejestrujące więcej zakresów widma, a obecnie krążą po orbitach satelity wykonujące zdjęcia aż w 360 zakresach promieniowania. Zwiększanie liczby zakresów ma na celu ułatwienie rozpoznawania obiektów i pozyskiwanie nowych informacji o znanych już obiektach.

Rozdzielczość radiometryczna zdjęć to z kolei liczba tonów szarych, jakie może rozróżnić i zarejestrować skaner między tonem białym a czarnym. Ta liczba wzrosła od 64 poziomów szarości w przypadku pierwszych zdjęć satelitarnych do 2048 poziomów w przypadku zdjęć wykonywanych przez współczesne satelity wysokorozdzielcze. Rozdzielczość radiometryczna, podobnie jak rozdzielczość spektralna, wpływa na rozpoznanie obiektów i ich charakterystykę.

Okres powtórnego wykonania zdjęcia tego samego obszaru nazywamy rozdzielczością czasową. W przypadku Landsata-1 ten okres wynosił 18 dni. Obecnie został on skrócony do 1-3 dni (w zależności od satelity), natomiast dla satelitów meteorologicznych wynosi on nawet 15 minut. Duża częstotliwość wykonywania zdjęć pozwala na badanie zjawisk szybkozmiennych i ich dynamikę, a także na monitorowanie zjawisk akcydentalnych.

Satelity wykonujące zdjęcia Ziemi krążą po orbitach przebiegających na różnych wysokościach i nachylonych w stosunku do płaszczyzny równika pod różnymi kątami. Najczęściej poruszają się one po tzw. orbicie heliosynchronicznej. Jest to orbita prawiebiegunowa, a poruszający się po niej satelita, dzięki sumowaniu się ruchu postępowego po orbicie i ruchu wirowego Ziemi, jest w stanie wykonać zdjęcia niemal całej powierzchni kuli ziemskiej (poza obszarami wokółbiegunowymi). Orbits heliosynchroniczne przebiegają na wysokościach około 600-900 km. Bardzo charakterystyczną jest tzw. orbita geostacjonarna. Przebiega ona w płaszczyźnie równika na wysokości prawie 36 000 km nad powierzchnią Ziemi. Satelita porusza się po niej z prędkością kątową równą prędkości kątowej ruchu wirowego Ziemi. Dla obserwatora na powierzchni Ziemi satelita ten robi wrażenie nieruchomego, zawieszono nad jednym punktem. Po tej orbicie poruszają się satelity meteorologiczne, zwane geostacjonarnymi, które wykonują zdjęcia całej półkuli z częstotliwością (rozdzielczością czasową) 15 minut i rozdzielczością przestrzenną 1 km w punkcie podsatelitarnym.

### **Zastosowania zdjęć satelitarnych**

Jako pierwsi zdjęciami satelitarnymi zainteresowali się geolodzy i meteorolodzy. Do swoich badań wykorzystali oni zdjęcia wykonywane jeszcze ręcznymi kamerami przez

astronautów w czasie misji statków załogowych Mercury, Gemini i Apollo. Wówczas to okazało się, że informacje pozyskiwane z dużych wysokości są niezwykle przydatne zarówno do celów meteorologii synoptycznej, jak i rozpoznania budowy geologicznej obszarów trudno dostępnych. Te pierwsze zdjęcia, wykonywane zupełnie przypadkowo przez zauroczonych pięknem globu ziemskiego astronautów, potwierdziły teorię rozwoju nizin barycznych i ich wędrówkę nad północnym Atlantykiem. Również geolodzy dokonali na ich podstawie wielu odkryć, m.in. nieciągłości budowy skorupy ziemskiej na obszarach pustynnych Bliskiego Wschodu, występowania złóż surowców mineralnych na terenie pustyni Namib w Afryce oraz w wielu innych pustynnych miejscach w Stanach Zjednoczonych i w Azji, jak też zaobserwowali strefy silnych spękań skorupy ziemskiej w miejscach występowania epicentrow trzęsień ziemi.

Jednak prowadzenie systematycznych badań środowiska nie mogło być uzależnione od wykonywania zdjęć tylko w czasie nielicznych lotów załogowych. Wzrastające zainteresowanie zdjęciami było przyczyną wprowadzenia na orbity satelitów operacyjnych, zdolnych do wykonywania zdjęć i przesyłania ich drogą telemetryczną do naziemnych stacji odbiorczych. Początek tym satelitom dał Landsat. Uruchomiony wraz z wystrzeleniem tego satelity program badawczy Amerykańskiej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) miał na celu określenie przydatności zdjęć satelitarnych do badań różnych komponentów środowiska. Wkrótce potem okazało się, że zdjęcia satelitarne mogą znaleźć zastosowanie we wszystkich dyscyplinach nauk o Ziemi.

### **Meteorologia**

Najpowszechniej zdjęcia satelitarne są dziś wykorzystywane w meteorologii. Na orbicie geostacjonarnej znajduje się obecnie pięć satelitów meteorologicznych, które co kilkanaście minut wykonują zdjęcia całego globu ziemskiego w kilku zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Zdjęcia te dostarczają informacji na temat aktualnego zachmurzenia i jego dynamiki, temperatury chmur oraz zawartości pary wodnej w atmosferze. Na podstawie tych informacji sporządza się prognozy pogody. Zdjęcia z satelitów geostacjonarnych wykorzystuje się do monitorowania cyklonów, śledzenia ich ruchów i ostrzegania przez zagrożeniami.

Oprócz satelitów geostacjonarnych atmosferę ziemską obserwują także inne satelity meteorologiczne krążące na niższych orbitach. Ich zadaniem jest pozyskiwanie bardziej szczegółowych informacji o atmosferze. Wśród nich wymienić należy przede wszystkim satelity serii NOAA, z których zdjęcia są odbierane przez wiele stacji zlokalizowanych w różnych krajach na wszystkich kontynentach. Kilka takich stacji odbiorczych jest także w Polsce. Zdjęcia wykonywane przez satelity NOAA znalazły szerokie zastosowanie nie tylko w meteorologii, ale także, a może nawet przede wszystkim, w badaniach roślinności. Wśród satelitów meteorologicznych na szczególną uwagę zasługuje ame-

rykański satelita Aura, wprowadzony na orbitę w 2004 r. Dostarcza on danych o składzie chemicznym atmosfery, jej temperaturze i wilgotności w całym profilu, zanieczyszczeniu atmosfery na różnych wysokościach, globalnym ruchu zanieczyszczonych mas powietrza, dynamice górnych warstw atmosfery oraz o zawartości ozonu w stratosferze.

Ozon należy do gazów śladowych występujących w atmosferze. Jego obecność w dolnych jej warstwach jest niepożądana, gdyż jest on zaliczany do gazów zanieczyszczających atmosferę i szkodliwych z punktu widzenia człowieka. Zupełnie odmienne jest znaczenie ozonu w górnych warstwach atmosfery, gdzie odgrywa on istotną funkcję, absorbując promieniowanie ultrafioletowe pochodzące od Słońca. Szczególnie dużo jest go w stratosferze, gdzie tworzy warstwę ozonu stratosferycznego. Zawartość ozonu w stratosferze zależy od szerokości geograficznej i pory roku. W połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku zauważono, że na ozon destrukcyjnie oddziałuje freon – gaz używany przez człowieka. Wydostając się z urządzeń gospodarczych, dostaje się do atmosfery, gdzie niszczy ozon, zmniejszając jego ilość w warstwie ochronnej i powodując tym samym wzrost zagrożenia dla życia na Ziemi (Molina, Rowland, 1974). W końcowym okresie lat siedemdziesiątych zaobserwowano spadek zawartości ozonu w całej atmosferze ziemskiej, szczególnie zaś nad biegunem południowym. Pomiary zawartości ozonu prowadzone nad Antarktydą ujawniły, że spadek ten rozpoczął się już w połowie lat pięćdziesiątych. Średnia dla października wynosiła wówczas ponad 300 Jednostek Dobsona, natomiast na początku lat dziewięćdziesiątych wynosiła niewiele ponad 100 JD. Obserwacje te były prowadzone w sposób punktowy metodami naziemnymi.

Pod koniec lat siedemdziesiątych do obserwacji zawartości ozonu w atmosferze ziemskiej (w stratosferze) włączono satelity. Zawartość ozonu w atmosferze została po raz pierwszy określona na podstawie danych zebranych za pomocą urządzenia o nazwie Total Ozon Mapping Spectrometer (TOMS), zainstalowanego na satelicie Nimbus 7, wystrzelonego 24 października 1978 r. (Parkinson, 1997). Pomiary dokonane za pomocą spektrometru umieszczonego na tym satelicie potwierdziły obserwowany spadek zawartości ozonu w atmosferze, dając jednocześnie przestrzenny obraz jego rozmieszczenia. Na podstawie zdjęć satelitarnych zauważono, że zmiany zawartości ozonu układały się prawie koncentrycznie ponad biegunem południowym, osiągając w centrum tego obszaru znacznie niższe wartości od średniej dla całego globu ziemskiego. Obszar ten został nazwany *dziurą ozonową*. Jest to określenie niepoprawne, acz powszechnie przyjęte. Za dziurę ozonową uważa się obszar w stratosferze, w którym ilość ozonu wynosi poniżej 220 JD.

Prowadzone przez satelity obserwacje zawartości ozonu w atmosferze potwierdziły, że dziura ozonowa pojawia się nad biegunem południowym w okresie wiosny antarktycznej (wrzesień, październik) i zanika w okresach późniejszych. 28 września 2001 r. zawartość ozonu nad biegunem południowym wyniosła zaledwie 100 JD, w 2000 r.

– 98 JD, a rekordowo mało ozonu zanotowano jesienią 1983 r. – zaledwie 88 JD. Jakkolwiek zawartość ozonu w atmosferze nad biegunem południowym podlega pewnym fluktuacjom, to jednak trzeba zauważyć, że ogólny trend wskazuje na stałe zmniejszanie się ilości ozonu w stratosferze nad biegunem południowym (Schoeberl, 1999).

Dziura ozonowa występuje także na półkuli północnej. Nie wykazuje ona tak niskich zawartości ozonu jak nad biegunem południowym. Dziura ta jest rzadko obserwowana przez satelity z powodu dużej dynamiki powietrza nad biegunem północnym i niestabilności obszaru o małej zawartości ozonu, który przemieszcza się także na niższe szerokości geograficzne. Sprawia to, że dziura ozonowa pojawia się niekiedy nawet nad Polską. Monitorowaniem zawartości ozonu w atmosferze nad Polską z wykorzystaniem satelitów zajmuje się krakowski oddział Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

### **Badania lodów biegunowych**

Jednym z ciekawszych zastosowań teledetekcji satelitarnej są badania lodów morskich pokrywających wody podbiegunowe. Lody te należą do najbardziej dynamicznych form pokrycia globu ziemskiego, które zmieniają swoje rozmiary nie tylko w zależności od pór roku, ale także z roku na rok. Zarówno lody morskie, jak też lądolody i lodowce oddziałują w istotny sposób na bilans energetyczny Ziemi. Lody morskie charakteryzują się wysokim współczynnikiem odbicia, znacznie większym niż otaczające je wody. Między odbiciem promieniowania przez lody a jego pochłanianiem przez wodę istnieje określona równowaga energetyczna. Naruszenie tej równowagi, na przykład przez zwiększenie powierzchni lodów, sprawi, że więcej energii słonecznej będzie odbijane w przestrzeń kosmiczną, a mniej absorbowane przez wodę. Nastąpi zatem ochłodzenie klimatu z tendencją do dalszego zwiększania się powierzchni lodów, kosztem otwartych wód morskich, co w konsekwencji doprowadzi do kolejnego ochładzania. Jeżeli natomiast nastąpi ocieplenie klimatu, wówczas zmniejszy się powierzchnia lodów morskich. Zatem mniej energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi będzie odbijane, więcej zaś pochłaniane przez rosnącą powierzchnię otwartych wód. To z kolei sprawi, że równowaga energetyczna zostanie naruszona i zwiększona dawka promieniowania słonecznego, zaabsorbowana przez wody, wpłynie na ocieplenie klimatu, co w konsekwencji doprowadzi do dalszego kurczenia się powierzchni lodów i ocieplenia. Znajomość zachowywania się powierzchni lodów morskich ma więc istotne znaczenie dla określenia tendencji zmian klimatycznych zachodzących obecnie na globie ziemskim.

Badania lądolodów polarnych, a także lodu morskiego w obszarach podbiegunowych napotykały na liczne trudności z uwagi na niedostępność terenu, surowe warunki klimatyczne, długie okresy nocy polarnej. Sytuacja zmieniła się radykalnie z chwilą wprowadzenia na orbitę pierwszego satelity wyposażonego w skaner rejestrujący promieniowanie mikrofalowe emitowane z powierzchni Ziemi. W grudniu 1972 r. Amerykańska

Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) umieściła na orbicie wokółziemskiej satelitę Nimbus 5, na pokładzie którego został zainstalowany mikrofalowy radiometr skanujący. Rejestrował on promieniowanie mikrofalowe, emitowane z powierzchni wody, jak i lodu morskiego. Promieniowanie mikrofalowe przenika przez chmury, więc ich obecność nie wpływała na rejestrację powierzchni globu ziemskiego. Można więc było prowadzić ją zarówno w dzień, jak i w nocy. A więc długa polarna noc nie stanowiła przeszkody w pozyskiwaniu informacji. W czasie nocy polarnej, z uwagi na znaczne spadki temperatury, następuje zwiększenie powierzchni pokrytej lodem morskim. A zatem wykonywanie zdjęć w tym okresie pozwoliło na rejestrację maksymalnego zasięgu lodu morskiego. Jedynym mankamentem tych pierwszych zdjęć mikrofalowych była bardzo mała przestrzenna zdolność rozdzielcza, gdyż rejestrowane fale cechowały się bardzo małą energią (Parkinson, Gloersen, 1993).

Rozwój techniki satelitarnej i dalsze doskonalenie narzędzi służących do pozyskiwania danych doprowadziły do wprowadzenia na orbitę satelitów, na pokładach których zostały zainstalowane nowe urządzenia, mianowicie radiolokatory obrazowe. Satelity wyposażone w te urządzenia miały własne generatory promieniowania mikrofalowego. Zainstalowany na satelicie skaner wysyłał wiązkę promieniowania mikrofalowego w kierunku powierzchni Ziemi, która po odbiciu wracała do anteny umieszczonej na satelicie. Sygnał mikrofalowy odebrany przez satelitę był następnie przesyłany do stacji naziemnej w celu dalszego przetwarzania. W efekcie tego zabiegu otrzymywano mikrofalowe zdjęcia satelitarne, zwane potocznie satelitarnymi zdjęciami radarowymi. Rozdzielczość przestrzenna tych zdjęć była nieporównanie lepsza od zdjęć wykonywanych przez poprzednią generację satelitów.

Mimo stosunkowo małej zdolności rozdzielczej mikrofalowe zdjęcia satelitarne, wykonane w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, umożliwiły określenie wielkości powierzchni pokrytej lodem morskim w obszarach podbiegunowych. Okazało się, że w Arktyce lód morski zajmuje największą powierzchnię w marcu. Wynosi ona wówczas około 15 mln km<sup>2</sup>. We wrześniu natomiast powierzchnia arktycznych lodów morskich jest najmniejsza. Lody morskie zajmują wtedy około 9 mln km<sup>2</sup>. Sezonowa zmiana powierzchni Oceanu Lodowatego skutej lodem obejmuje zatem obszar około 6 mln km<sup>2</sup>.

W Antarktyce powierzchnia lodu morskiego jest również największa na przełomie zimy i wiosny, który na półkuli południowej przypada we wrześniu. Wtedy to lód pokrywa około 19 mln km<sup>2</sup> wód morskich, rozciągających się wokół Antarktydy. Z kolei pod koniec lata, a zatem w lutym, powierzchnia lodów morskich wokół Antarktydy jest najmniejsza i wynosi tylko około 4 mln km<sup>2</sup>. Różnica powierzchni zajętej przez lód morski w lecie i zimy wynosi więc około 15 mln km<sup>2</sup> (Parkinson, 1987).

Od 1972 r., czyli od chwili rozpoczęcia wykonywania pierwszych mikrofalowych zdjęć satelitarnych, obszary podbiegunowe są niemal bez przerwy obrazowane przez



coraz to doskonalsze urządzenia montowane na różnych satelitach. Na podstawie ponad trzydziestoletniej serii obserwacyjnej stwierdzono, że obszar pokryty lodem morskim wokół bieguna północnego stale kurczy się. Określono, że tempo zmniejszania się powierzchni paku lodowego wynosi około 3% w ciągu dziesięciu lat. W okresie 1972-2002 powierzchnia lodów morskich w Arktyce zmniejszała się o około 300 000 km<sup>2</sup> w ciągu dekady. Stale prowadzone obserwacje wskazują, że tempo tego procesu nasila się i w ostatniej dekadzie powierzchnia lodów morskich wokół bieguna północnego zmniejszyła się już o ponad 360 000 km<sup>2</sup> (NASA, 2004). Kurczenie się pokrywy lodowej sprawia, że odbija ona mniej promieniowania. Więcej energii słonecznej jest pochłonięte przez wodę, w efekcie czego następuje dalsze ocieplenie, co z kolei wpłynie na dalsze zmniejszenie się pokrywy lodowej.

### **Teledetekcja w badaniach mórz i oceanów**

Niezmiernie dużo informacji dostarczyły satelity przeznaczone do badań mórz i oceanów. Dotychczasowe badania tych zbiorników wodnych były ograniczone do punktów lub szlaków, wzdłuż których poruszały się statki handlowe oraz statki badawcze. Zdjęciami satelitarnymi i innymi obserwacjami prowadzonymi z przestrzeni kosmicznej objęto całe oceany. Wśród wielu niezwykle interesujących obserwacji dokonanych za pomocą satelitów należy wymienić zjawisko El Niño oraz urzeźbienie powierzchni wód.

Już od dawna wiadomo, że na rozległych obszarach równikowych wód Pacyfiku występują dwa ciepłe prądy morskie: Równikowy Prąd Wsteczny i Prąd Południoworównikowy. Rozdzielone są one zimnymi prądami Prądu Peruwiańskiego. W niektórych jednak latach zanikają zimne wody Prądu Peruwiańskiego i na rozległych wodach środkowego Pacyfiku dominują ciepłe wody, których obecność jest przyczyną wielkich anomalii klimatycznych w całym międzyzwrotnikowym obszarze globu ziemskiego. To zjawisko zanikania zimnych wód Prądu Peruwiańskiego ma miejsce tylko w niektórych latach i zaczyna się zwykle pod koniec grudnia. Trwa ono zwykle do marca. Nosi ono nazwę El Niño.

Pasaty, wiejąc ku zachodowi, spychają gorące wody powierzchniowe w pobliże Australii i Indonezji, gdzie powierzchnia wody jest wyższa o około 45 cm w stosunku do poziomu oceanu u wybrzeży Meksyku. Wzdłuż wybrzeży wschodniego Pacyfiku, a szczególnie wzdłuż wybrzeży Ekwadoru i Peru, zimne wody podpowierzchniowe wypływają na powierzchnię, zastępując zepchnięte ku zachodowi (Australii) wody ciepłe. Pojawienie się El Niño zmienia ten układ. Z przyczyn jeszcze nieznanych co kilka lat słabną lub zupełnie ustają pasaty. Wobec braku pasatów powierzchniowe wody morskie nie przesuwały się ku zachodowi, ale zaczynają się cofać w kierunku Ameryki Południowej, zajmując ogromne obszary międzyzwrotnikowych wód Pacyfiku (WMO, 1997).

Pierwszych informacji na temat temperatury wód Pacyfiku dostarczyły satelity pod koniec lat siedemdziesiątych. Wykonane w styczniu 1979 r. zdjęcia w dalekiej podczerwieni z pokładu satelity NOAA pokazały obraz zimnych wód Prądu Peruwiańskiego otoczonych wodami prądów ciepłych. Zdjęcia wykonywane w kolejnych latach w tym samym okresie potwierdzały ten stan rozkładu prądów morskich. Dopiero zdjęcie wykonane w styczniu 1983 r. ujawniło odmienną sytuację, mianowicie zanik zimnego prądu Peruwiańskiego. Od tego momentu do badań zjawiska El Niño włączono wiele innych satelitów. Warto zaznaczyć, że w XX wieku zaobserwowano 23 pojawienia się El Niño. Spośród 10 najsilniejszych zjawisk aż 4 wystąpiły po 1980 r. i były obserwowane przez satelity.

Od 1992 r. do akcji zbierania informacji o wodach Pacyfiku został włączony amerykańsko-francuski satelita Topex/Posejdon. Urządzenia zainstalowane na tym satelicie, krążącym na wysokości 1340 km, mierzą zmiany wysokości poziomu powierzchni wody, a także dostarczają innych danych o cyrkulacji oceanicznej. W 2001 r. do badań oceanów, w tym zjawiska El Niño, dołączył nowy satelita Jason-1, a w 2002 r. satelita Aqua wyposażony w wiele wysokiej klasy spektrometrów. Satelity te dostarczają coraz więcej danych na temat mórz i oceanów, umożliwiając coraz pełniejsze rozumienie roli oceanów w zmianach klimatycznych.

W lipcu 1978 r. Agencja do spraw Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) umieściła na orbicie satelitę Seasat. Był to pierwszy satelita mikrofalowy przeznaczony do badań morza. Mimo stosunkowo krótkiego okresu pracy na orbicie (zaledwie 100 dni) dostarczył on wiele informacji o temperaturze wód oceanicznych, wiatrach przy powierzchniowych wiejących nad oceanami, wysokości fal morskich oraz o rzeźbie powierzchni wód. Opracowana na podstawie danych pozyskanych przez tego satelitę mapa topografii powierzchni mórz i oceanów przedstawia występowanie na morzach i oceanach zarówno wzniesień, jak i zagłębień. Szczególnie widoczne jest na tej mapie wypiętrzenie wód na środkowym Atlantyku, doskonale widoczne są także rowy oceaniczne (Ciołkosz, 1989). Potwierdzenia pomiarów i obserwacji dokonanych za pomocą satelity Seasat dostarczyły kolejne satelity mikrofalowe (np. satelity Europejskiej Agencji Kosmicznej serii ERS, a także satelity specjalnie przeznaczone do badań mórz i oceanów – Topex/Posejdon, Jason). Dziś wiadomo, że powierzchnia wody oddaje z pewnym przybliżeniem rzeźbę dna i widoczne na zdjęciach, a także obserwowane przez astronautów z przestrzeni kosmicznej, urzeźbienie powierzchni oceanów jest spowodowane lokalnymi różnicowaniami grawitacyjnego pola Ziemi.

### **Wykorzystanie zdjęć satelitarnych w Polsce**

Już w 1975 r., a więc w niecałe trzy lata po wprowadzeniu na orbitę pierwszego satelity środowiskowego pracującego w systemie operacyjnym, rząd Polski podjął

decyzję o powołaniu specjalnego ośrodka, którego celem byłaby analiza przydatności zdjęć satelitarnych w gospodarce. Pierwsze zdjęcia wykonane nad Polską przez satelitę Landsat, jakie dotarły do wspomnianego ośrodka, objęły tereny Górnego Śląska. Na zdjęciach były wyraźnie widoczne dymy emitowane z wielkich zakładów przemysłowych zlokalizowanych na terenie Polski, a także Czechosłowacji. Mimo różnej sytuacji barometrycznej, a także różnych kierunków wiatrów w Polsce i Czechosłowacji, dymy emitowane z czeskich zakładów przemysłowych wskutek specyficznych warunków orograficznych docierały nad terytorium Polski. Wyniki analizy rozprzestrzeniania się dymów w strefie przygranicznej, przeprowadzonej na podstawie wielu zdjęć satelitarnych, wykazały niepodważalny fakt docierania zanieczyszczeń powietrza z obszaru Czechosłowacji na tereny południowej Polski (Ciołkosz, Majcher, Sujkowska, 1981).

Seria zdjęć satelitarnych wykonana nad południową Polską pokazała również bardzo niekorzystną lokalizację wielkich zakładów przemysłowych w pobliżu Krakowa. Bez względu na kierunek wiatrów to historyczne miasto zawsze było narażone na zwiększone zanieczyszczenie powietrza. Szczególnie groźna była emisja zanieczyszczeń z huty aluminium w Skawinie. Zdjęcia satelitarne zostały wykorzystane do udowodnienia oddziaływania tego zakładu przemysłowego na miasto i przyczyniły się w dużym stopniu do podjęcia decyzji o jego zamknięciu (Trafas, 1995).

Zdjęcia satelitarne zostały wykorzystane również do oceny wpływu innych dużych zakładów przemysłowych na środowisko. Na pograniczu Polski, NRD i Czechosłowacji znajdował się jeden z większych w Europie rejonów wydobywania węgla brunatnego. Tu znajdowały się także wielkie elektrownie polskie i niemieckie opalane tym węglem. Emitowały one duże ilości pyłów do atmosfery. W dniu 2 marca 1979 r. satelita Landsat wykonał zdjęcie tego terenu. Było to w sześć dni po dużym opadzie śniegu. Na zdjęciu wyraźnie widoczny jest zasięg opadu pyłów emitowanych ze wspomnianych elektrowni. Na podstawie tego zdjęcia określono zasięg niekorzystnego oddziaływania Elektrowni Turów na środowisko, obliczono wielkość emisji, a także podjęto decyzję o lokalizacji naziemnej sieci pomiarowej opadu pyłów (Ciołkosz, Majcher, Sujkowska, 1981).

Emisja pyłów i gazów z tych elektrowni, a także emisja zanieczyszczeń powietrza docierających aż do tego regionu Polski z innych krajów Europy wywołały tak katastrofalne zniszczenia środowiska, że obszar ten został nazwany *Czarnym Trójkątem*. Zniszczenia te objęły przede wszystkim lasy świerkowe w Sudetach. Spustoszenia na terenie tych lasów były tak rozległe, że można je było zaobserwować na zdjęciach satelitarnych. Na początku lat dziewięćdziesiątych zastosowano więc zdjęcia satelitarne do określenia rodzaju i zasięgu zniszczeń w drzewostanach świerkowych. Na podstawie zdjęć wykonanych przez satelitę Landsat określono stopnie uszkodzenia drzewostanów. Wtedy też wykorzystano archiwalne zdjęcia satelitarne wykonane w połowie lat siedemdziesiątych do odtworzenia sytuacji z początków klęski ekologicznej na tym terenie. Porównanie

zdjęć pozwoliło na ocenę dynamiki zniszczeń, a także oszacowanie wielkości obszaru dotkniętego w różnym stopniu tą klęską (Bochenek, Ciołkosz, Iracka, 1997).

Innym przykładem zastosowania zdjęć satelitarnych była ocena zasięgu fali powodziowej w trakcie katastrofalnej powodzi w dolinie Bugu w 1978 r. i w Dolinie Odry w 1997 r. W pierwszym przypadku wyjątkowa pogoda umożliwiła wykonanie doskonałych zdjęć satelitarnych w momencie maksymalnego zasięgu fali powodziowej. Zdjęcia satelitarne zostały dostarczone z włoskiej stacji odbiorczej do Polski już w kilka godzin po przelocie satelity i w trzy dni później odpowiednim władzom przekazano mapę obrazującą zasięg powodzi wraz z informacjami o rodzaju i powierzchni zalanych użytków (Ciołkosz, Gronet, 1982).

Niestety w czasie powodzi w dolinie Odry w lipcu 1997 r. warunki pogodowe były znacznie gorsze. Żaden z satelitów pracujących w widmie optycznym nie mógł wykonać zdjęć tego terenu. Tak się jednak złożyło, że nad doliną górnej Odry znalazł się mikrofalowy satelita Europejskiej Agencji Kosmicznej – ERS-2. Wykonał on zdjęcie w momencie maksymalnej fali powodziowej w górnym biegu Odry. W trzy dni później satelita ERS-2 znalazł się nad środkowym biegiem Odry, akurat wtedy kiedy fala powodziowa dotarła do tego miejsca. ERS-2 wykonał jeszcze dwukrotnie zdjęcia dolnego odcinka Odry, także w momentach maksymalnego zasięgu fali powodziowej. Tak więc na kolejnych czterech zdjęciach został zobrazowany maksymalny zasięg powodzi w całej dolinie Odry. Zasięg powodzi określony na podstawie satelitarnych zdjęć mikrofalowych został nałożony na mapę użytkowania ziemi opracowaną również na podstawie interpretacji zdjęć satelitarnych. W efekcie tego określono powierzchnię i rodzaj użytków zalanych wodą. Opracowana mapa została w trybie operacyjnym dostarczona Komitetowi Przeciwpowodziowemu do planowania odpowiednich akcji ograniczających skutki powodzi (Ciołkosz, Bielecka, 1998).

### **Pokrycie terenu**

Zdjęcia satelitarne wykonywane już na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku przez satelity operacyjne przeznaczone do badania środowiska znalazły szerokie zastosowanie w kartowaniu pokrycia terenu oraz użytkowania ziemi. Początkowo, gdy rozdzielczość przestrzenna wykonywanych zdjęć była stosunkowo mała, opracowywano na ich podstawie mapy w skalach przeglądowych rzędu 1:1 000 000 - 1:250 000. Z chwilą pojawienia się satelitów wykonujących zdjęcia o rozdzielczości kilkunastu, a nawet kilku metrów, zaczęto opracowywać mapy w skalach znacznie większych, nawet 1:25 000. Opracowywane mapy miały służyć przede wszystkim określeniu zmian, jakie zachodzą w środowisku zarówno pod wpływem czynników naturalnych, jak również wskutek działalności człowieka. Wyniki najnowszych badań nad globalnymi zmianami środowiska wskazują, że sposoby użytkowania ziemi oraz zmiany pokrycia terenu mogą wywierać większy wpływ na przeobrażenia środowiska niż czynniki klimatyczne. Trzeba

jednak podkreślić, że związki między sposobami użytkowania ziemi i pokrycia terenu a zmianami globalnymi nie są jeszcze dostatecznie zrozumiałe. Wynika to między innymi z niewystarczającej wiedzy na temat rozmieszczenia poszczególnych form użytkowania ziemi i pokrycia terenu w skali globalnej. Wobec narastającego problemu dokładniejszego określenia spodziewanych zmian zachodzących w środowisku, wiele instytucji i organizacji naukowych, a także rządowych, podejmuje działania zmierzające do pozyskania szczegółowych danych o środowisku biofizycznym i procesach zachodzących w ekosystemach, zarówno lądowych, jak i morskich, a także socjoekonomicznych oddziaływaniach na te ekosystemy.

Wśród wielu projektów, których celem było kartowanie pokrycia terenu z wykorzystaniem danych dostarczanych przez zdjęcia satelitarne, należy wymienić projekt Unii Europejskiej CORINE Land Cover (CLC), w realizacji którego brała udział także Polska. Celem tego projektu było opracowanie bazy danych o pokryciu terenu, początkowo w krajach Europy Zachodniej, a później także Środkowej, na podstawie zdjęć wykonanych w 1990 r. przez amerykańskiego satelitę Landsat. Zgodnie z założeniami metodycznymi, na obszarze Europy wyróżniono 44 klasy pokrycia terenu, przy czym najmniejszy wyróżniany obszar miał powierzchnię 25 ha. Opracowana baza danych miała służyć zarówno celom badawczym, np. określanie ilości pochłanianego dwutlenku węgla, jak również celom praktycznym, takim jak prowadzenie wspólnej polityki rolnej i środowiskowej na obszarze całej Unii Europejskiej (Baranowski, Ciołkosz, 1997).

W założeniach projektu określono, że baza danych będzie aktualizowana co dziesięć lat. Tak więc w 2000 r. przystąpiono do kartowania pokrycia ziemi na podstawie zdjęć wykonanych na przełomie XX i XXI wieku. Również w tym projekcie wzięła udział Polska. Formalnie projektowi temu w naszym kraju patronował Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, a opracowania bazy podjął się Instytut Geodezji i Kartografii. W bazie danych zarówno z roku 1990, jak i 2000 znalazły się informacje o rozmieszczeniu na obszarze Polski 34 form pokrycia terenu. Z analizy bazy danych wynika, że Polska jest krajem rolniczym – 64% powierzchni całego kraju zajmują tereny, na których prowadzona jest różnego rodzaju gospodarka rolna, 30% powierzchni kraju zajmują lasy, niewiele ponad 3% zajmują obszary, które w nomenklaturze CLC są nazywane terenami zantropogenizowanymi. Do nich zalicza się tereny osadnictwa, a także tereny przemysłowe i handlowe, komunikacyjne, kopalnie odkrywkowe, budowy oraz miejskie tereny zielone. Pozostałe 3% powierzchni kraju zajmują mokradła i wody.

Celem programu CORINE Land Cover było nie tylko opracowanie baz danych, ale też ich porównanie w celu uchwycenia zmian, jakie zaszły na danym terenie w ciągu dziesięciolecia. Porównanie baz danych, opisujących formy pokrycia terenu na początku lat dziewięćdziesiątych i dziesięć lat później, pozwoliło na wyciągnięcie wielu wniosków odnoszących się do zmian, jakie zaszły na obszarze całej Polski. Trzeba jednak zazna-

czyć, że założenia wyznaczania zmian też były ściśle określone. Według obowiązującej metodyki za zmianę formy użytkowania ziemi uznawano tylko takie, które zaszły na obszarze o wielkości co najmniej 25 ha lub 5 ha w przypadku, gdy zmiana dotyczyła powiększenia lub zmniejszenia zasięgu istniejącej formy pokrycia terenu (Bielecka, Ciołkosz, 2004).

Opracowane bazy danych o pokryciu terenu znalazły w Polsce, podobnie jak w wielu innych krajach Europy, szerokie zastosowanie w pracach badawczych oraz w praktyce. Wykorzystano je m.in. do określenia skutków, jakie wywołała powódź w dolinie Odry w 1997 r., wyznaczania obszarów chronionych, określonych w Dyrektywie UE Natura 2000, czy też do określania wpływu wielkich zakładów przemysłowych na środowisko.

## **Rolnictwo**

Współczesne osiągnięcia teledetekcji satelitarnej, wyrażające się zwiększeniem przestrzennej, spektralnej i radiometrycznej zdolności rozdzielczej zdjęć, a także częstotliwości ich wykonywania, sprawiły, że stała się ona użytecznym narzędziem do pozyskiwania informacji także na potrzeby rolnictwa. Zdjęcia wykonywane z wysokości orbitalnych znalazły zastosowanie w:

- rozpoznawaniu upraw i obliczaniu zajętego przez nie areалу,
- ocenie stanu roślin,
- prognozowaniu plonów.

### *Rozpoznawanie upraw i szacowanie zajętych przez nie powierzchni*

Prace nad rozpoznawaniem upraw odwzorowanych na zdjęciach satelitarnych zostały podjęte już w połowie lat siedemdziesiątych w Stanach Zjednoczonych. Wówczas to amerykańskie ośrodki, zajmujące się zagadnieniami rozwoju zastosowań teledetekcji, podjęły eksperyment pod nazwą CITARS (*Crop Identification Technology Assessment for Remote Sensing*), zmierzający do oceny przydatności zdjęć wykonanych przez satelitę Landsat do rozpoznania upraw kukurydzy i soi. Osiągnięto wówczas ponad 90% trafności rozpoznania i określenia powierzchni zajętych przez obie te uprawy w wybranych regionach Stanów Zjednoczonych. W 1974 r. Ministerstwo Rolnictwa USA, wspólnie z Agencją do spraw Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) i Krajowym Urzędem do Spraw Oceanów, Mórz i Atmosfery (NOAA), podjęło kolejny projekt pod nazwą LACIE (*Large Area Crop Inventory Experiment*), mający na celu wykorzystanie zdjęć satelitarnych do oceny wielkości zbiorów pszenicy w głównych obszarach jej produkcji na świecie. W ciągu trzech pierwszych lat trwania tego projektu prowadzono prace badawcze na obszarach produkcji pszenicy w Stanach Zjednoczonych. Stwierdzono wówczas, że za pomocą zdjęć satelitarnych można nie tylko rozpoznać pola pszeniczne i określić ich wielkość, ale także ze stosunkowo dużą dokładnością określić zbiory tego zboża. W następnych latach rozciągnięto eksperyment na inne obszary produkcji

pszenicy (Kanadę, Argentynę, Związek Radziecki). Osiągnięte wyniki pozwoliły uznać opracowaną metodę rozpoznawania pszenicy i ocenę jej zbiorów za metodę zapewniającą wystarczająco dokładne rezultaty do celów gospodarczych (NASA, 1978). W 1980 r. przedsięwzięto nowy eksperyment pod nazwą AgRISTARS (*Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing*). Głównym jego celem było doskonalenie metod rozpoznawania upraw i oceny warunków wzrostu roślin na podstawie informacji dostarczanych przez satelity, a także doskonalenie modeli prognozowania plonów ważniejszych upraw (NASA, 1981).

W Polsce pierwsze próby wykorzystania teledetekcji satelitarnej w badaniach z zakresu rolnictwa podjął w latach 1994-1996 Instytut Geodezji i Kartografii, przy współudziale Instytutu Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, biorąc udział w realizacji projektu badawczego – *Regional Inventory*, dotyczącego zastosowania teledetekcji w określeniu powierzchni upraw. Projekt ten był częścią europejskiego programu wykorzystania metod teledetekcji w rolnictwie – MARS (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*). Jego celem było określenie powierzchni głównych upraw z wykorzystaniem metody opracowanej w krajach Unii Europejskiej, bazującej na materiałach teledetekcyjnych. Metoda ta została nieco zmodyfikowana i dostosowana do polskich warunków. Zakładała ona wykorzystanie wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych do sporządzania mapy stratyfikacji obszarów rolniczych, utworzenie sieci obszarów testowych, przeprowadzenie terenowego uczytelnienia zdjęć lotniczych w celu identyfikacji odfotografowanych na nich upraw, wykorzystanie modelu matematycznego do określenia arealu poszczególnych upraw rozpoznanych na obszarach testowych. Przy sporządzaniu mapy stratyfikacyjnej, oprócz aktualnych wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych, wykorzystano także nieco zgeneralizowaną mapę przydatności rolniczej gruntów. W wyniku realizacji wspomnianego projektu określono powierzchnię głównych upraw w pięciu ówczesnych województwach położonych w centralnej Polsce (poznańskie, konińskie, płockie, włocławskie i ciechanowskie). Otrzymane wyniki porównano z rezultatami uzyskanymi przez Główny Urząd Statystyczny. Okazało się, że różnice w oszacowaniu powierzchni i struktury upraw są minimalne. Jednak za pomocą teledetekcji otrzymuje się wyniki bez porównania szybciej, a także znacznie taniej (Bochenek i in. 1997).

#### *Ocena stanu roślin*

W chwili obecnej największe zastosowanie w rolnictwie znajduje teledetekcja satelitarna w ocenie stanu roślin. Przyczynił się do tego niewątpliwie fakt szerokiego dostępu do zdjęć wykonywanych przez satelity meteorologiczne serii NOAA. Mimo stosunkowo małej przestrzennej zdolności rozdzielczej tych zdjęć, wyrażającej się pikselem o wielkości zaledwie  $1000 \times 1000$  m, duża częstotliwość ich wykonywania oraz znikomy koszt pozyskiwania wpłynął na powszechność wykorzystania zdjęć satelitarnych serii NOAA w ocenie stanu rozwoju roślin uprawnych.

Satelity serii NOAA wykonują zdjęcia za pomocą wielospektralnego radiometru AVHRR w kilku pasmach widma elektromagnetycznego, w tym w promieniowaniu widzialnym, oraz w bliskiej i dalekiej podczerwieni. Zdjęcia wykonane w dwóch pierwszych pasmach, tj. w widmie widzialnym i bliskiej podczerwieni są wykorzystywane do tworzenia tak zwanych wskaźników zieleni wykorzystywanych jako indykatory obecności i kondycji zielonej roślinności. W licznych pracach stwierdzono, że najlepsze rezultaty w badaniach roślinności można uzyskać, posługując się tak zwanym znormalizowanym wskaźnikiem zieleni (NDVI), który jest stosunkiem różnicy wielkości promieniowania zarejestrowanego przez radiometr AVHRR w promieniowaniu podczerwonym i czerwonym do sumy wartości promieniowania zarejestrowanego w obu tych pasmach widma.

Obszary pokryte roślinnością charakteryzują się większymi wartościami wskaźnika NDVI ponieważ odbijają dużo promieniowania podczerwonego i stosunkowo mało widzialnego, w porównaniu z obszarami niepokrytymi roślinnością. Duże odbicie promieniowania w podczerwonym zakresie widma związane jest z obecnością chlorofilu w roślinach i specyfiką budowy liści.

Wskaźnik zieleni NDVI znalazł szerokie zastosowanie w ocenie stanu roślin, zwłaszcza w początkowych fazach rozwojowych. Jego wielkość może być analizowana ze stosunkowo dużą częstotliwością w ciągu okresu wzrostu i rozwoju roślin uprawnych, począwszy już od momentu zaniku pokrywy śnieżnej. Wówczas to duże obszary terenów rolnych są zupełnie pozbawione pokrywy roślinnej (pola przeznaczone pod zboża jare lub rośliny okopowe) bądź pokrywa ta jest niewielka i promieniowanie odbija się także od gleby. W takich to warunkach wartość wskaźnika NDVI jest stosunkowo niska. W miarę wzrostu roślin i zasłaniania nimi coraz większej powierzchni gleby rośnie też wartość wskaźnika NDVI aż do momentu przebarwienia roślin, wywołanego ich dojrzewaniem i zanikiem chlorofilu, co w przypadku zbóż przypada na fazę kłoszenia.

Wartości wskaźników zieleni NDVI, obliczone dla poszczególnych momentów rozwoju roślin, są porównywane ze stanem roślin uprawnych określanym w toku bezpośrednich obserwacji w terenie, a także uzyskanymi plonami. Gromadzenie w ciągu kilku-kilkunastu lat wartości wskaźników NDVI, obliczonych dla danego obszaru, pozwala na określenie ich przebiegu w ciągu całego okresu wegetacyjnego w różnych latach: dobrych, złych i przeciętnych z punktu widzenia rolnictwa i uzyskanych plonów. Porównanie wartości aktualnego znormalizowanego wskaźnika zieleni NDVI z wartością z wielolecia, określoną dla tego samego terminu obserwacji, daje możliwość jego oceny w wartościach względnych, a więc czy aktualny wskaźnik NDVI jest mniejszy, równy czy też większy od średniego wskaźnika, obliczonego dla lat charakteryzujących się średnimi i ekstremalnymi plonami. Obserwacja zmian wskaźników zieleni NDVI, określanych np. co tydzień, umożliwia także analizę zróżnicowania przestrzennego rozkładu warunków wzrostu roślin (Bochenek, 1999).



Zdjęcia satelitarne wykonane w dalekiej podczerwieni umożliwiają pomiar temperatury powierzchni czynnej, a więc gleby i pokrywającej ją roślinności. Te informacje mogą być wykorzystane do szacowania wielkości ewapotranspiracji. W tym przypadku konieczne jest również wykorzystanie wyników pomiaru salda promieniowania na stacjach meteorologicznych. Wielkość ewapotranspiracji również świadczy o dostępie roślin do wody, a tym samym o warunkach ich rozwoju. Ponieważ wielkość ewapotranspiracji można określić dla każdego piksela reprezentującego roślinność, stąd też można otrzymać informacje o przestrzennym zróżnicowaniu tego zjawiska, jakim jest aktualna ewapotranspiracja. Duża rozdzielczość czasowa zdjęć satelitarnych, czyli duża częstotliwość ich wykonywania, umożliwia analizę zmian ewapotranspiracji w ciągu okresu wzrostu i dojrzewania roślin co pozwala na wnioskowanie o stanie roślin uprawnych (Dąbrowska-Zielińska i in. 2001).

#### *Prognozowanie plonów*

Prognozowanie plonów jest dotychczas najmniej rozwiniętą dziedziną zastosowań teledetekcji w rolnictwie. Dotychczasowe badania przeprowadzone w różnych krajach świata, w tym także i w Polsce, dowiodły istnienia relacji między wskaźnikiem powierzchni projekcyjnej liści – LAI, określonym w ściśle zdefiniowanej fazie rozwojowej roślin, a plonem niektórych upraw. Prace te mają jednak w dalszym ciągu charakter badawczy.

W 1999 r. w Instytucie Geodezji i Kartografii podjęto prace nad wykorzystaniem nowych wskaźników roślinnych, otrzymywanych na podstawie zdjęć satelitarnych, do szacowania plonów głównych zbóż. Zastosowano tak zwany Wskaźnik Kondycji Roślin oraz Wskaźnik Termicznej Kondycji Roślin. W toku badań wyznaczono dwa okresy rozwoju roślinności, w których wskaźniki te najlepiej oddają stan upraw. Te dwa okresy mają decydujący wpływ na wielkość plonów. Pierwszy okres przypada w większości analizowanych przypadków na tygodnie 14-16 roku kalendarzowego, drugi zaś na tygodnie 22-25. Wykorzystując oba wskaźniki, opracowano model szacowania plonów zbóż i na jego podstawie wykonano prognozę plonów głównych zbóż w 1997 r. na cztery tygodnie przed żniwami. Wyniki oszacowania porównano następnie z szacunkiem plonów przeprowadzonym przez GUS. Średni błąd oszacowania plonów dla 49 województw wyniósł 3,83% (Dąbrowska-Zielińska i in. 2002).

#### **Zakończenie**

Postęp gospodarczy i cywilizacyjny, jaki towarzyszy człowiekowi od bardzo dawna nasilił się ogromnie w ostatnim wieku. Tylko w tym okresie liczba ludności świata wzrosła z około 1,5 mld do ponad 6 mld. Wywołało to określone konsekwencje w środowisku, wyrażające się m.in. zajmowaniem nowych terenów na potrzeby wyżywienia ludności, pozyskiwaniem coraz to większych ilości surowców, zarówno odnawialnych, jak i nieodnawialnych, zmniejszeniem się powierzchni lasów oraz przyrostem terenów

nieużytecznych. Działalność gospodarcza człowieka przyczyniła się do zachwiania równowagi między komponentami środowiska geograficznego, co najdobitniej wyraża się zwiększeniem zanieczyszczenia środowiska, jak i obserwowanymi coraz wyraźniej zmianami klimatycznymi z ich konsekwencją w postaci nasilających się zjawisk o charakterze klęsk żywiołowych.

Ciągły wzrost liczby mieszkańców Ziemi, kurcząca się powierzchnia lasów, degradacja gruntów ornych przy wielce ograniczonym przyroście nowych ziem uprawnych, wypadanie znacznych obszarów z gospodarczego użytkowania, wzrastające zanieczyszczenie środowiska, duża liczba katastrof naturalnych (cyklony, ulewne deszcze, powodzie, erupcje wulkaniczne, trzęsienia ziemi) sprawiają, że konieczny staje się ciągły monitoring środowiska, umożliwiający lepsze nim zarządzanie w skali regionów, krajów, a nawet kontynentów. Ponieważ wspomniane zjawiska i procesy mają charakter coraz bardziej globalny, dlatego też do ich szeroko pojętego monitoringu potrzebne są odpowiednie narzędzia, spośród których najbardziej przydatne okazały się informacje dostarczane z wysokości orbitalnych.

W ciągu ostatnich trzydziestu lat na orbity wokółziemskie wprowadzono wiele satelitów teledetekcyjnych przeznaczonych do obserwacji Ziemi. Agencje Aerokosmiczne zrzeszone w Międzynarodowym Komitecie Satelitów Obserwacyjnych Ziemi (CEOS – *Committee of Earth Observation Satellites*) planują do 2010 r. realizację ponad 70 misji satelitarnych. Można przyjąć, że do połowy drugiej dekady XXI w. będzie niemal 120 misji satelitarnych, ukierunkowanych na pozyskiwanie danych o różnych aspektach globu ziemskiego (CEOS, 1997).

Dane zbierane przez satelity wzbogacą naszą wiedzę o atmosferze, dostarczając informacji o zawartych w niej aerozolach, gazach śladowych, ozonie, a także o wilgotności i temperaturze powietrza, kierunkach wiatrów i ich prędkości, rodzajach chmur i właściwościach cząsteczek zawieszonych w chmurach. Przyczynią się także do pozyskania nowych informacji o lądach (w tym bilansie energetycznym globu ziemskiego, rzeźbie powierzchni terenu, użytkowaniu ziemi i pokryciu terenu, wilgotności gleby, rozmieszczeniu i stanie roślinności). Dane te w największym stopniu przyczynią się do poznania oceanów i ich wpływu na klimat kuli ziemskiej. Satelity dostarczają bowiem szczegółowych informacji o barwie wody morskiej, biologii morza, rzeźbie powierzchni mórz i oceanów, prądach morskich, temperaturze wody, wiatrach powierzchniowych i wysokości fal morskich. Wreszcie nowe satelity dostarczają informacji o kriosferze (topografii lądolodów, zaleganiu pokrywy śniegowej i jej grubości, zlodzeniu wód morskich, grubości i wieku pokrywy lodowej). Warto wspomnieć, że dotychczasowe 40 lat obserwacji Ziemi z przestrzeni kosmicznej zaowocowało także lepszym poznaniem naszego globu, wyrażającym się m.in. w precyzyjniejszym określeniu kształtów bryły ziemskiej, poznaniu dynamiki zmian tych kształtów, zaobserwowaniu ruchu płyt

kontynentalnych, rozpoznaniu skutków wielkich erupcji wulkanicznych czy wreszcie obserwowaniu zmian klimatycznych. Należy przy tym zauważyć, że wielu wyników badania globu ziemskiego nie można by uzyskać z poziomu naziemnego, jak również lotniczego.

Polscy naukowcy już od pierwszych chwil docenili rolę satelitów obserwacyjnych Ziemi zarówno w badaniach naukowych, jak i w gospodarce. Już od początku lat siedemdziesiątych do programów studiów uniwersyteckich na wielu kierunkach został wprowadzony nowy przedmiot nauczania – teledetekcja satelitarna. Na uwagę zasługuje także specjalna publikacja skierowana do uczniów szkół podstawowych i średnich, mianowicie *Atlas zdjęć satelitarnych Polski* (Ciołkosz, Ostrowski, 1995) wraz ze specjalnym przewodnikiem metodycznym służącym jako pomoc w nauczaniu rozumienia środowiska i jego historii z wykorzystaniem informacji pozyskiwanych przez satelity. Celem tego opracowania jest przygotowanie najmłodszej generacji do pełnego korzystania ze zdobyczy, jakie w dziedzinie poznawania globu ziemskiego niesie technologia kosmiczna i obrazowanie globu ziemskiego z wysokości orbitalnych.

## Literatura

- Baranowski M., Ciołkosz A., *Opracowanie bazy danych „pokrycie terenu Polski”*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, 1997, t. XLIV, z. 95, s. 7-25.
- Bielecka E., Ciołkosz A., *Mapa pokrycia terenu w Polsce w skali 1:1 000 000 jako wynik wizualizacji bazy danych CLC-2000*. Polski Przegląd Kartograficzny, 2004, t. 36, nr 4, s. 276-289.
- Bochenek Z., Ciołkosz A., Faber A., Filipiak K., *Application of Remote Sensing Methods for Estimating Area of the Main Crops in Poland*. Statistics in Transition. Journal of the Polish Statistical Association, 1997, vol. 3, no 1, pp. 109-122.
- Bochenek Z., Ciołkosz A., Iracka M., *Zmiany stanu lasów w Sudetach Zachodnich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, 1997, t. XLIV, z. 95, s. 73-91.
- Bochenek Z., *Operacyjne wykorzystanie zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR do oceny warunków rozwoju upraw w Polsce*. Fotointerpretacja w geografii – Problemy telegoinformacji, 1999, nr 29, s. 3-13.
- Ciołkosz A., *Badania mórz i oceanów za pomocą satelitów*. Przegląd Geofizyczny, 1989, t. 34, nr 3, s. 277-283.
- Ciołkosz A., Bielecka E., *Powódź w dolinie Odry w świetle interpretacji zdjęć satelitarnych*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, 1998, t. XLV, z. 97, s. 81-95.
- Ciołkosz A., Gronet R., *Rozwój sytuacji powodziowej w dolinie Bugu i Narwi wiosną 1979 r. zarejestrowanej na landsatowskich zdjęciach satelitarnych*. Fotointerpretacja w Geografii, 1982, t. 6 (16), s. 9-21.
- Ciołkosz A., Majcher I., Sujkowska W., *Wyznaczanie zasięgów rozprzestrzeniania się dymów przemysłowych na podstawie zdjęć satelitarnych*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, 1981, t. XXVIII, nr 1(67), s. 19-43.
- Ciołkosz A., Ostrowski M., *Atlas zdjęć satelitarnych Polski*. SCI-ART, Warszawa 1995 r. 130 s.

- Dąbrowska-Zielińska K., Ciołkosz A., Kowalik W., Gruszczyńska M., *Teledetekcyjna metoda oceny stanu rozwoju roślin uprawnych i szacowania plonów głównych zbóż w Polsce*. Teledetekcja środowiska, 2001, nr 32, s. 40-60.
- Dąbrowska-Zielińska K., Kogan F., Ciołkosz A., Kowalik W., Gruszczyńska M., *Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices*. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, vol. 23, no. 6, 1109-1123.
- Molina M.J., Rowland F.S., Stratospheric sink for chlorofluorometanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 1974, vol. 249, no. 5460, pp. 810-812.
- NASA, *AgRISTARS-annual report*. FY 1980. Houston, Texas 1981.
- NASA, *Independent peer evaluation of the large area crop inventory experiment (LACIE)*. Proceedings of Technical Session. NASA, JSC-16015, NTIS, Springfield, VA, 1978.
- NASA, *Eyes Ice Changes Around Earth's Frozen Caps*. earthobservatory.nasa.gov/ 2004.
- Parkinson C.L. *Earth from Above. Using Color-coded satellite images to examine the global environment*. University Science Books. Sausalito, California, 1997, 173 s.
- Parkinson C.L., Gloersen P., *Global sea ice coverage*, [w:] *Atlas of satellite observations related to global change*. Edited by J.R. Gurney, J.L. Foster, C.L. Parkinson, Cambridge University Press, 1993, s. 371-383.
- Parkinson, C.L., *Arctic sea ice 1973-1976. Satellite passive microwaves observations*. NASA, Washington, 1987.
- Parkinson, C.L., Rothrock D.A., Scambos T., *Climate Change in the Arctic and Antarctic: The Latest Observational Evidence on Changes in Sea and Ice Shelves*. Proceedings USGCRP Seminar. Washington. 2000.
- Schoeberl M.R., *Ozone and Stratospheric Chemistry*, [w:] *EOS Science Plan*, NASA, Washington, 1999, s. 309-336.
- Trafas K., *Atmosfera nad Krakowem w obrazie satelitarnym*, [w:] *Atmosfera nad Krakowem, przeszłość, teraźniejszość, przyszłość*. Polski Klub Ekologiczny, PTPNoZ, cykl „Problemy ekologiczne Krakowa” z. 18. Kraków 1995, s. 21-23.
- World Meteorological Organization (WMO), *El Nino Update*. Report No.183. Geneva, 1997. s. 1-7.

#### **Satellite remote sensing as the source of information about objects, phenomena and processes occurring on the Earth**

A term „remote sensing” has been defined in this article, along with presentation of development of aerospace technology. The author also characterised images acquired by environmental satellites. Some aspects of application of satellite remote sensing in studies of chosen components of geographical environment have been discussed, emphasising a unique nature of information acquired by remote sensing satellites. The application of remote sensing in studies of atmosphere, including depletion of ozone and formation of ozone hole above the south pole, as well as application of satellite imagery in studying El Niño phenomenon have been discussed. A role of microwave satellite images in providing data on the global sea ice coverage and monitoring polar ice fields changes have also been presented. The author presented some examples of application of satellite images in studies of geographical environment in Poland.

**Key words:** remote sensing , satellite images, environment