

Katarzyna Dąbrowska-Zielińska, Andrzej Ciołkosz, Maria Budzyńska,
Wanda Kowalik
Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

MONITOROWANIE WZROSTU I PLONOWANIA ZBÓŻ METODAMI TELEDETEKCJI

Streszczenie

Na podstawie zdjęć satelitarnych, wykonanych w różnych zakresach widma elektromagnetycznego, określono wskaźniki roślinne, które charakteryzują energię odbitą i emitowaną z powierzchni czynnej. Wielkość tej energii jest związana z biofizycznymi parametrami roślin, takimi jak: powierzchnia projekcyjna liści (*LAI*), temperatura roślin (*Ts*), pochłonięte promieniowanie fotosyntetycznie czynne (*APAR*). Wskaźniki roślinne otrzymane na podstawie danych satelitarnych wykorzystano do szacowania uwilgotnienia obszarów rolnych i prognozowania plonów. W artykule przedstawiono metodę monitorowania wzrostu i plonowania zbóż z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych AVHRR/NOAA i ENVISAT/MERIS.

Słowa kluczowe: zdjęcia satelitarne, wskaźniki roślinne, wskaźniki wilgotności gleby, model PLONSAT, plon

Wstęp

W Instytucie Geodezji i Kartografii (IGiK) stosuje się techniki teledetekcji satelitarnej m.in. do monitorowania warunków wzrostu i rozwoju roślin uprawnych, szacowania plonów, wykrywania obszarów dotkniętych suszą rolniczą. Na orbitach okołoziemskich krąży wiele satelitów rejestrujących powierzchnię terenu z różną rozdzielczością spektralną, przestrzenną, radiometryczną i czasową. Zdjęcia o wysokiej rozdzielczości przestrzennej pozyskiwane są co kilkanaście dni, natomiast o niskiej – codziennie. Duża częstotliwość wykonywania zdjęć satelitarnych ma znaczenie w warunkach Polski z uwagi na częste zachmurzenie naszego kraju. Do modelowania warunków wzrostu i plonowania zbóż wykorzystano zdjęcia rejestrowane codziennie zarówno przez skaner AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) znajdujący się na satelicie NOAA (rozdzielczość przestrzenna 1000 m), jak i przez radiometr MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) znajdujący się na satelicie ENVISAT (rozdzielczość przestrzenna 300 m). Zakres badań obejmował tereny woj. wielkopolskiego i lubuskiego, przy czym szczegółowe pomiary naziemne wykonano w latach 2003-2005 na obszarze Wielkopolski. Jest to obszar typowo rolniczy o niewielkich de-

niwelacjach, zajęty głównie przez pola uprawne o dużym areale, z dominującymi uprawami pszenicy, pszenżyta, jęczmienia, rzepaku, buraków cukrowych i kukurydzy. Wielkopolska charakteryzuje się najniższymi w kraju opadami (często poniżej 500 mm rocznie) i średnio-długim okresem wegetacyjnym (170-180 dni). Mimo, iż warunki przyrodnicze Wielkopolski nie należą do sprzyjających gospodarce rolnej (gleby średnie i lekkie, warunki meteorologiczne zmienne), plony zbóż są tu jedne z większych w Polsce. Jest to spowodowane długą tradycją w dziedzinie wysokiego poziomu kultury rolnej. Według Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) najwyższe z dziesięciolecia 1995-2005 plony wystąpiły w 2004 r., a najniższe w 2003 r. [GUS 1995-2005]. Badania wykonano w zróżnicowanych warunkach meteorologicznych, co stwarzało możliwość dostosowania kalibracji modeli do szerokiego spektrum uwarunkowań plonotwórczych.

W trakcie badań terenowych wykonano pomiary parametrów charakteryzujących wzrost roślin, pomiary wilgotności gleby oraz pomiary meteorologiczne. Do mierzonych parametrów roślinnych należały: powierzchnia projekcyjna liści *LAI* Leaf Area Index ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), biomasa świeża i sucha B_w , B_s (gm^{-2}), liczba kłosów na 1 m^2 , liczba ziaren w kłosie i ciężar 1000 ziaren. Notowana była także faza rozwojowa roślin i ich kondycja. Pomiary parametrów meteorologicznych, takich jak: temperatura i wilgotność powietrza, prędkość wiatru, całkowite promieniowanie słoneczne i bilans promieniowania, wykonywano własną przenośną stacją automatyczną.

Do modelowania wielkości produkcji roślinnej w pierwszej kolejności zastosowano model rekurencyjny PROBE, który oblicza wskaźnik *LAI* na podstawie danych meteorologicznych, a następnie biomasę i plony. W dalszej kolejności zmodyfikowano model PROBE, do którego wprowadzono wartości wskaźnika *LAI* i ewapotranspiracji obliczone na podstawie zdjęć satelitarnych (model PLONSAT). Opracowana metoda szacowania plonów zbóż na podstawie danych otrzymywanych z modelu PLONSAT może dostarczać informacji prognostycznych jeszcze przed żniwami.

Zastosowane zdjęcia satelitarne

Zdjęcia satelitarne wykonane przez satelitę NOAA zostały odebrane przez stację zainstalowaną w IGIK. Zdjęcia te zostały poddane korekcji radiometrycznej i geometrycznej, obliczono wartości współczynników odbicia w zakresie czerwonym i podczerwonym oraz temperaturę powierzchni czynnej (T_s), którą poddano korekcji. Informacje pozyskane ze zdjęć NOAA posłużyły do wyprowadzenia danych niezbędnych do określenia korelacji pomiędzy wskaźnikiem *LAI* zmierzonym w terenie w trakcie przelotu satelity nad obszarem badawczym, a wskaźnikiem roślinnym NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) oraz wskaźnikiem wilgotności gleby, obliczonym w funkcji stosunku ciepła jawnego do utajonego (H/LE).

Zdjęcia satelitarne MERIS, rejestrujące dany obszar jednocześnie w 15 kanałach spektralnych, otrzymano z Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) w ramach projektu CAT-1 1427. Warstwę powierzchni rolniczej z CORINE LC nałożono na zdjęcia satelitarne MERIS. Następnie przeprowadzono rozpoznanie upraw, wykorzystując metodę klasyfikacji nadzorowanej. Duże znaczenie w wykonywaniu klasyfikacji upraw na zdjęciu MERIS ma wybór odpowiednich zakresów spektralnych [Dąbrowska-Zielińska i in. 2005]. Wyniki rozpoznania poszczególnych upraw wykorzystano do określenia położenia pól obsianych zbożem na zdjęciach AVHRR.

Szacowanie wskaźnika LAI ze zdjęć AVHRR/NOAA

Dane pozyskane przez radiometr AVHRR w czerwonym i podczerwonym zakresie widma (1 i 2 kanał) wykorzystuje się do obliczania wskaźnika zieleni *NDVI* według wzoru:

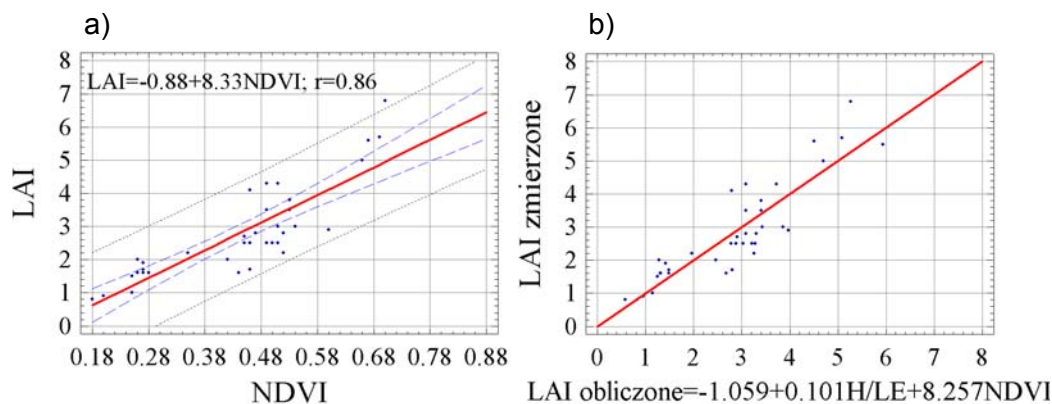
$$NDVI = (A_2 - A_1) / (A_2 + A_1) \quad (1)$$

gdzie: A_1 , A_2 - wartości współczynnika odbicia w zakresie czerwonym (580-680 nm) i podczerwonym (720-1100 nm).

Rośliny zielone charakteryzują się dużą wartością wskaźnika *NDVI*, natomiast suche, żółte – małą. Wynika to z maksymalnej absorpcji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie czerwonym i niewielkiej w zakresie podczerwonym, gdzie występuje maksymalne jego odbicie. W celu zbudowania algorytmu pozwalającego na szacowanie *LAI* z danych AVHRR w pierwszej kolejności poddano analizie wartości *LAI* zmierzone w terenie w trakcie przelotu satelity nad badanym obszarem oraz wartości *NDVI* obliczone na podstawie danych satelitarnych. Wykorzystując wyniki klasyfikacji zdjęć satelitarnych MERIS wybrano tylko te piksele na zdjęciu NOAA, które obejmowały obszary obsiane zbożem. Wartości wskaźników *LAI* dla każdego piksela NOAA zostały uśrednione z pól, na których wykonywano pomiary naziemne. Wyniki zależności między wskaźnikami *LAI* (zmierzonym w terenie) i *NDVI* (obliczonym z danych AVHRR) przedstawia rysunek 1a. W dalszej kolejności zastosowano dodatkowo wskaźnik wilgotności gleby (*H/LE*) obliczony z zastosowaniem danych rejestrowanych przez AVHRR i parametrów meteorologicznych [Dąbrowska-Zielińska 1995]. W celu otrzymania wartości ewapotranspiracji obliczono gęstość strumienia ciepła utajonego (*LE*) z uproszczonego równania bilansu cieplnego:

$$RN = LE + H + G \quad (2)$$

gdzie: RN – strumień różnicowy promieniowania, Wm^{-2} ,
 H – gęstość strumienia ciepła jawnego wynikającego z różnicy temperatury powierzchni i temperatury powietrza, Wm^{-2} ,
 LE – gęstość strumienia ciepła utajonego, Wm^{-2} ,
 G – gęstość strumienia ciepła wymianianego pomiędzy powierzchnią czynną a podłożem, Wm^{-2} .



Rys. 1. Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI zmierzonym w terenie i: a- wskaźnikiem NDVI, b- LAI obliczonym wg równania zamieszczonego pod rysunkiem
 Fig. 1. Relationship between LAI index measured in the field and: a- NDVI index, b- LAI calculated according to the equation (3) given below the figure

Od różnicy temperatur T_s i T_a zależy wielkość ciepła jawnego (H) obliczanego poniższym wzorem:

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / r_a \quad (3)$$

gdzie: ρ - gęstość powietrza,
 C_p - ciepło właściwe powietrza,
 T_s - temperatura powierzchni czynnej uzyskana ze zdjęć satelitarnych,
 T_a - temperatura powietrza,
 r_a - opór powietrza.

Z chwilowych wartości LE zostały obliczone wartości dobowej ewapotranspiracji E_d (mm) [Dąbrowska-Zielińska 1995]. Stosunek H/LE jest udowodnionym wskaźnikiem wilgotności gleby w strefie korzeniowej roślin [Dąbrowska-Zielińska 1995]. Rysunek 1b przedstawia zależność pomiędzy wielkością LAI zmierzoną w terenie i obliczoną z wykorzystaniem wskaźników $NDVI$ i H/LE ($R^2 = 0,79$). Zależność ta została wykorzystana do obliczenia LAI ze wszystkich dostępnych zdjęć satelitarnych NOAA z lat 2003-2005, które to wartości zasiliły następnie model PLONSAT.

Szacowanie plonów zbóż ze wskaźnika LAI

Wskaźnik LAI odzwierciedla aktualne warunki wzrostu i rozwoju roślin oraz jest możliwy do obliczenia na podstawie danych satelitarnych o dużej rozdzielczości czasowej jak np. AVHRR/NOAA. Jak wykazały wcześniejsze badania przeprowadzone w IGiK, maksymalne wartości wskaźnika LAI dla zbóż, które przypadają na fazę kłoszenia, są ściśle związane z plonem.

Podczas badań poddano analizie dane dotyczące *LAI* i plonów, otrzymane w wyniku prac terenowych. Otrzymano dużą zależność pomiędzy wskaźnikiem *LAI* (wartością maksymalną z danego sezonu wegetacyjnego) i plonem obliczonym na podstawie danych terenowych zebranych pod koniec fazy dojrzewania zbóż podstawowych ($PLON = 9,31 LAI + 11,03$, $R^2 = 0,79$). Otrzymany algorytm może być wykorzystany do szacowania plonów zbóż na podstawie maksymalnej wartości wskaźnika *LAI* obliczanego z danych satelitarnych NOAA lub z modelu PLONSAT.

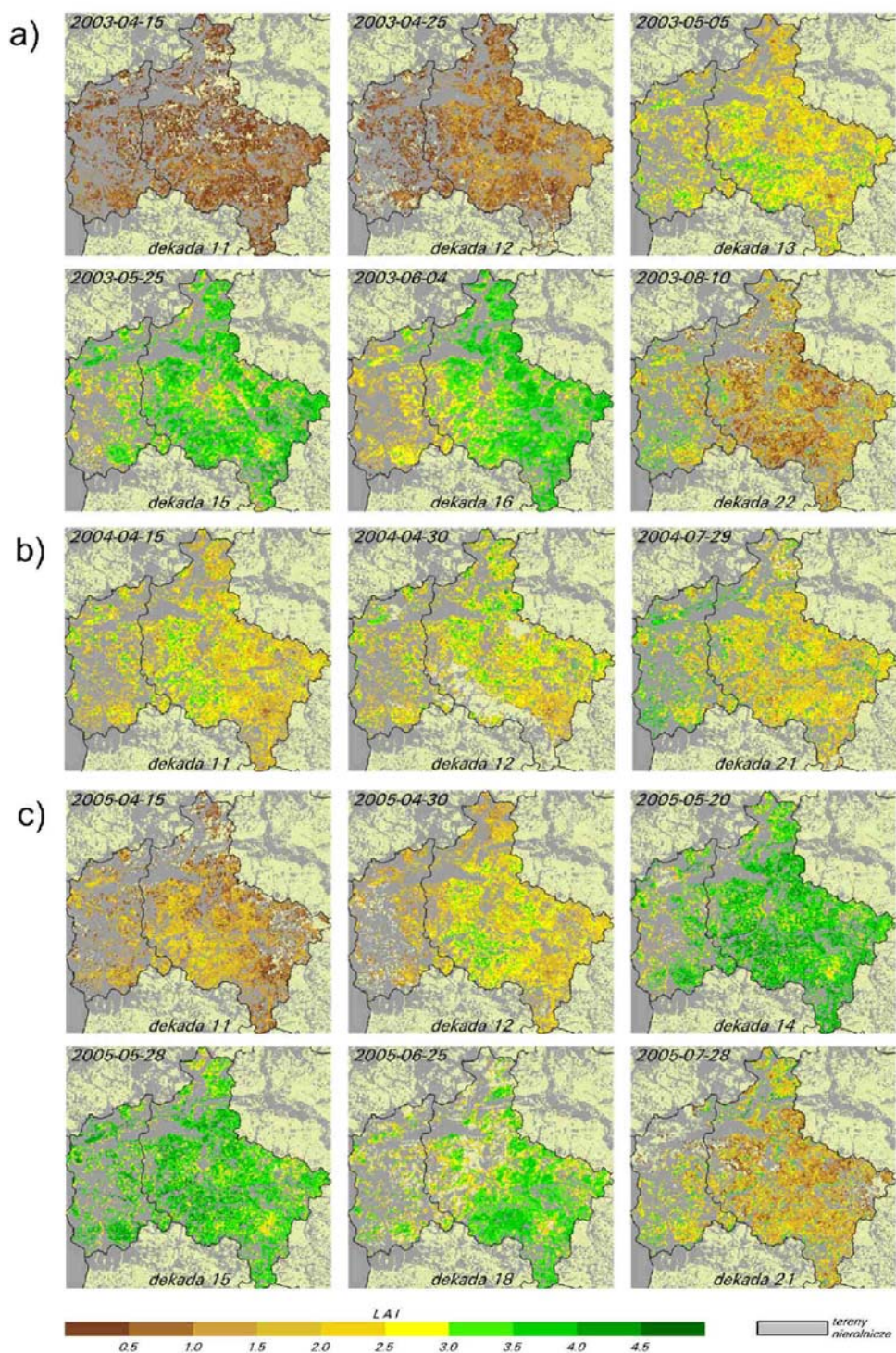
Zastosowanie modeli PROBE i PLONSAT

Model PROBE [Dąbrowska-Zielińska i in. 1998, 2001] jest prostym modelem integrującym parametry meteorologiczne i odpowiednio przygotowane parametry będące wskaźnikami glebowo-roślinnymi. Opracowany w IGIK model PLONSAT wykorzystuje wskaźnik *LAI* wyprowadzony z danych AVHRR/NOAA.

Model PROBE symuluje dzienny przyrost biomasy świeżej w okresie wegetacyjnym i na tej podstawie podaje końcową produkcję roślinną. Model ten oblicza ilość akumulowanego promieniowania fotosyntetycznie czynnego *APAR*, przyrost biomasy (ΔB) oraz przyrost *LAI* (ΔLAI). Dużą zaletą modelu PROBE jest to, że bazuje na niewielkiej liczbie danych - początkowa wartość *LAI* i dane meteorologiczne, takie jak promieniowanie całkowite przeliczone na promieniowanie fotosyntetycznie czynne (*PAR*) oraz temperatura powietrza. Dodatkowo, mając wartości wilgotności powietrza i prędkości wiatru, oblicza wielkość ewapotranspiracji.

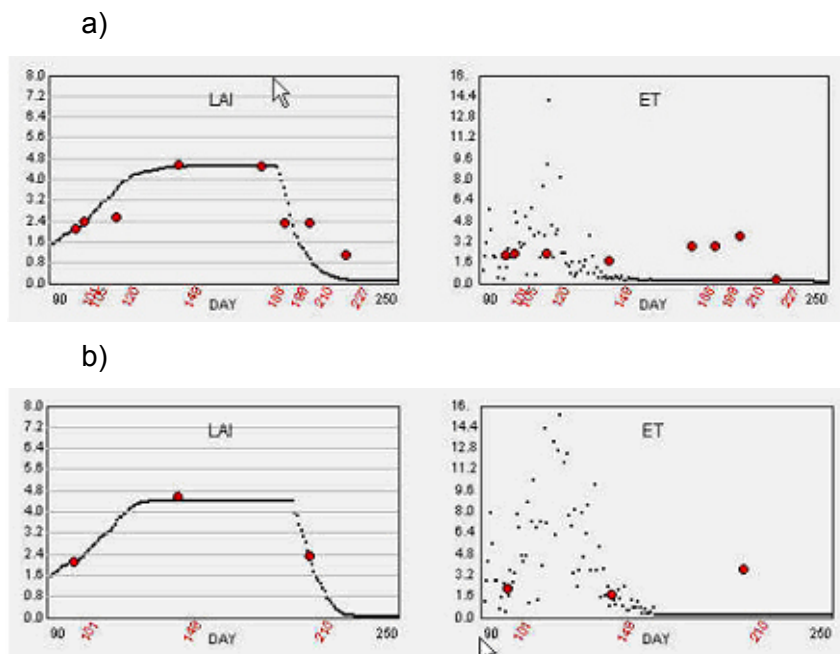
Model PROBE został zmodyfikowany przez dostarczenie wartości *LAI* obliczonych ze zdjęć satelitarnych według równania przedstawionego na rysunku 1b i nazwany PLONSAT. Wówczas parametry modelu uległy ponownej parametryzacji i kalibracji, a otrzymane wyniki końcowej produkcji roślinnej stały się dokładniejsze. Otrzymane wyniki przedstawia rysunek 2, z którego można odczytać, że wartości *LAI* były najniższe w woj. lubuskim w 2003 r. (pierwsza dekada czerwca, rys. 2a). Wysokie wartości *LAI* wystąpiły pod koniec maja 2005 r. (rys. 2c). Uśrednione dla województw wielkopolskiego i lubuskiego wartości *LAI* zostały następnie wprowadzone do modelu PLONSAT w celu obliczenia plonu. W tabeli 1 zamieszczono uśrednione wartości wskaźnika *LAI* i ewapotranspiracji dobowej (*ET*) dla obu województw określone dla tych dni sezonu wegetacyjnego 2004, w których zostały wykonane zdjęcia satelitarne.

Na rysunku 3 przedstawiono graficzne wyniki symulacji modelu na przykładzie woj. wielkopolskiego. Symulację wartości *LAI* i *ET* (E_d) przeprowadzono, wprowadzając do modelu wartości *LAI* i *ET* (E_d) obliczone z wykorzystaniem ośmiu zdjęć satelitarnych (tab. 1). Pierwsze wartości obliczono dla dnia 101, ostatnie zaś dla dnia 227.



Rys. 2. Rozkład wskaźnika LAI obliczonego dla wybranych dni w latach 2003–2005
Fig. 2. Distribution of LAI index calculated for selected days within the years 2003–2005

Rysunek 3a przedstawia przebieg LAI i ET przy uwzględnieniu pomiarów przeprowadzonych dla ośmiu dni, natomiast na rysunku 3b przedstawiono przebieg tych wskaźników przy ograniczonej do trzech liczbie pomiarów. Z przedstawionych wykresów przyrostu LAI i ewapotranspiracji widać, że już trzy wartości LAI wprowadzone do modelu dają bardzo dobre wyniki symulacji. Pierwsza wartość pochodzi z początkowego okresu wegetacji, druga z okresu maksymalnego wzrostu roślinności, natomiast trzecia z fazy końcowej.



Rys. 3. Symulacja wartości LAI i ET dla województwa wielkopolskiego dla 2004 r.
Fig. 3. Simulation of LAI and ET values for Wielkopolskie region for 2004

Tabela. 1. Uśrednione wartości wskaźnika LAI i ET dla województw wielkopolskiego i lubuskiego dla rejestracji satelitarnych w 2004 r.

Table 1. Averaged values of LAI and ET indices for Wielkopolskie and Lubuskie regions for satellite recordings in 2004

Dzień	Wielkopolskie		Lubuskie	
	LAI	ET	LAI	ET
101	2,06	2,01	2,13	1,85
105	2,31	2,08	2,33	2,03
120	2,5	2,09		
149	4,56	1,52	4,66	1,55
188	4,51	2,65	4,58	2,77
199	2,29	2,70		
210	2,29	3,52	2,78	3,34
227	0,98	0,02	1,19	2,64

W tabelach 2 i 3 przedstawiono wyniki symulacji wartości wskaźników *LAI* i *APAR* obliczone przez model *PLONSAT* dla obu rozpatrywanych województw. W kolumnie pierwszej znajdują się dane dotyczące maksymalnych wartości *LAI* (LAI_{max}) z zaznaczeniem dnia roku (DR), w którym te wartości wystąpiły, w kolejnej kolumnie przedstawiono dane dotyczące sum pochłoniętego promieniowania fotosyntetycznie czynnego (*APAR*) i sum promieniowania całkowitego przeliczonego na promieniowanie fotosyntetycznie czynne (*PAR*), zaś w ostatniej znajdują się wartości sum temperatur do dnia wystąpienia maksymalnej wartości wskaźnika *LAI*.

Tabela. 2. Wyniki symulacji modelu *PLONSAT* dla lat 2003–2005 dla województwa wielkopolskiego

Table 2. Simulation results of *PLONSAT* model for the years 2003-2005 in Wielkopolskie region

WIELKOPOLSKIE	LAI_{max}/DR	$\Sigma APAR$	ΣPAR Jcm^{-2}	$APAR/PAR$	SUMGDD °C
2003	2,95/158	341	598	0,57	944
2004	4,57/161	406	548	0,74	866
2005	2,8/160	325	548	0,59	795

Tabela. 3. Wyniki symulacji modelu *PLONSAT* dla lat 2003–2005 dla województwa lubuskiego

Table 3. Simulation results of *PLONSAT* model for the years 2003–2005 in Lubuskie region

LUBUSKIE	LAI_{max}/DR	$\Sigma APAR$	ΣPAR Jcm^{-2}	$APAR/PAR$	SUMGDD °C
2003	3,02/148	291	552	0,52	857
2004	4,73/156	370	498	0,74	760
2005	2,37/150	267	473	0,56	751

Analizując dane zawarte w tabelach można stwierdzić, że maksymalne wartości *LAI* i wskaźnika charakteryzującego produktywność - $APAR/PAR$, wystąpiły w 2004 r., w którym nie zanotowano zjawiska suszy, natomiast najmniejsze w latach 2003 i 2005, dotkniętych silną suszą. Wskaźnik ten został zastosowany w modelu do obliczenia plonów pszenicy ozimej.

Suma temperatur powietrza w obu rozpatrywanych województwach do dnia, kiedy wystąpiła maksymalna wartość wskaźnika *LAI*, była najwyższa w 2003 r. w woj. wielkopolskim i wyniosła 944°C, o 149°C więcej niż w 2005 r. W 2003 r. była również najwyższa sumaryczna radiacja słoneczna. Podobne zróżnicowanie akumulowanej temperatury powietrza zaobserwowano w woj. lubuskim. Obliczona przez model maksymalna wartość wskaźnika *LAI* wystąpiła w zbliżonym okresie w woj. wielkopolskim tj. około 160 dnia roku, natomiast w woj. lubuskim niemal o 10 dni wcześniej.

Maksymalna wartość wskaźnika *LAI* w woj. wielkopolskim była znacznie wyższa w 2004 r. niż w latach 2003 i 2005, dotkniętych suszą. Wartości plonów pszenicy ozimej opublikowane przez GUS [GUS 1995-2005] dla poszczególnych województw porównano z wartościami otrzymanymi z modelu PLONSAT dla lat 2003–2005. Największa różnica wystąpiła w przypadku woj. wielkopolskiego w 2005 r. Ostatnim terminem, w którym zostało wykonane bezchmurne zdjęcie satelitarne nad tym obszarem był 166 dzień roku. Brak informacji o wielkości wskaźnika *LAI* w późniejszym terminie (kiedy jego wielkość mogła być jeszcze większa niż zaobserwowana) mógł wpłynąć na wielkość tej różnicy. W pozostałych latach różnica pomiędzy szacunkiem plonów według GUS a plonem symulowanym z modelu była niska.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań zbudowano model PLONSAT służący do prognozowania plonu zbóż, będący modyfikacją modelu PROBE. Model ten wykorzystuje dane satelitarne rejestrowane przez satelity serii NOAA, obejmujące powierzchnię całego kraju. Z danych tych oblicza się wartości wskaźnika *LAI*. Stwierdzono, że ich minimalna liczba nie powinna być mniejsza niż trzy i powinna obejmować wartości pochodzące z początku okresu wegetacyjnego, tj. około dnia 100 roku oraz przed i po wystąpieniu wartości maksymalnych *LAI*. Do modelu zostały również wprowadzone wartości dobowej ewapotranspiracji *ET* (E_d), obliczone z chwilowych wartości strumienia ciepła utajonego, jak również z dobowej wartości strumienia różnicowego radiacji. Efektem obliczeń dokonanych przez model PLONSAT są dobowe oraz akumulowane wartości *APAR*, ewapotranspiracji, sumy temperatur powietrza oraz wskaźnika *APAR/PAR*.

Plon został obliczony w funkcji wskaźnika *APAR/PAR*, a następnie porównany z danymi opublikowanymi przez GUS (dla pszenicy). Analiza porównawcza wykazała stosunkowo dużą zgodność wyników. Względny błąd średniokwadratowy dla wszystkich trzech lat wyniósł 13,3%. Informacje otrzymywane z opracowanych modeli pozwalają na ciągłe monitorowanie rozwoju zbóż i szacowanie produkcji roślinnej jeszcze przed żniwami, co pozwala zainteresowanym jednostkom gospodarczym na wcześniejsze podjęcie odpowiednich decyzji ekonomicznych.

Bibliografia

- Dąbrowska-Zielińska K. 1995. Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA. PAN, Prace Geograficzne Nr 165, Wydawnictwo Continuo, Wrocław
- Dąbrowska-Zielińska K., Jankowski R., Faber A. 1998. Preparation of MERA agrometeorological databases, test of WOFOST and PROBE models in Poland, EU Proc. of PHARE, MARS and MERA Results Conference, Space Applications Institute: 291-300

Dąbrowska-Zielińska K., Moran M.S., Maas S.J., Pinter P.J. Jr., Kimball B.A., Mitchell T.A., Clarke T.R., Qi J. 2001. Demonstration of a remote sensing/modelling approach for irrigation scheduling and crop growth forecasting. *Journal of Water and Land Development*, 5: 69-87

Dąbrowska-Zielińska K., Ciołkosz A., Gruszczyńska M., Hosiło A. 2005. Application of ENVISAT MERIS; TERRA ASTER and MODIS data for crop yield modelling. Proc. of the 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy "New Quality in Environmental Studies", Warsaw, Poland: 739-747

GUS. Wyniki produkcji roślinnej w latach 1995-2005. Warszawa