

Eugene I. PONOMAREV

V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Academgorodok, Krasnoyarsk, Russia
phone: (+7 3912) 49 40 92
e-mail: evg@ksc.krasn.ru, ponomarev@wp.pl

TECHNOLOGIA SPORZĄDZANIA CODZIENNYCH OCEN ZAGROŻENIA POŻAROWEGO Z WYKORZYSTANIEM SATELITARNEJ TELEDETEKCJI W REGIONIE KRASNOJARSKIM (SYBERIA WSCHODNIA, ROSJA)

TECHNOLOGY OF DAILY WEATHER FIRE DANGER ESTIMATION BY MEANS
OF SATELLITE REMOTE SENSING IN KRASNOYARSK REGION (RUSSIA)

***Abstract.** The method of daily fire danger estimation for Siberian forests is described and discussed. It utilizes an algorithm developed at the Laboratory of Remote Sensing of V. N. Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk. The result of processing is the fire danger index assessed by means of weather condition data obtained remotely from NOAA POES-series satellites (National Oceanic and Atmospheric Administration Polar Operational Environmental Satellite, USA). Finally, the maps of fire danger spatial pattern are generated daily over the Eastern Siberia region with the use of GIS technology.*

***Key words:** Fire danger index, remote sensing, satellite digital image, GIS.*

1. WPROWADZENIE

Intensyfikacja wykorzystania zasobów drzewnych syberyjskich lasów wymaga podniesienie poziomu ich ochrony, w tym również zapobieganie pożarom lasu. O wielkiej roli pożarów, jako czynnika stresowego na obszarach leśnych Rosji, świadczy areal lasów dotkniętych tym kataklizmem – corocznie jest to około 6%, podczas gdy w Europie Zachodniej obszar ten nie przekracza setnych części procenta, a w Kanadzie tylko 1–3% (AMIRO, STOCKS 2001; SHVIDENKO, GOLDAMMER 2001).

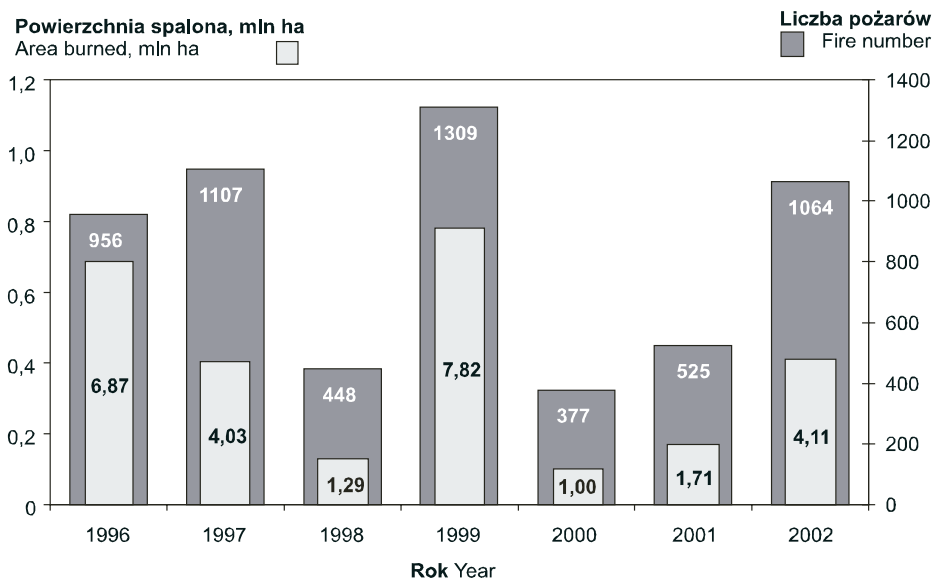
W niektórych częściach Syberii oraz rosyjskiego Dalekiego Wschodu w ostatnich dekadach bardzo często występowały długotrwałe susze oraz towarzyszące im niszczycielskie pożary lasów. Lasy iglaste Syberii Wschodniej są zagrożone przez pożary w stopniu najwyższym. Około 83% pożarów odnotowanych w lasach na obszarze azjatyckiej części Rosji przypadało właśnie na Syberię Wschodnią (VALENDIK, IVANOVA 2001). Dlatego za uzasadnioną należy uznać tezę, że roślinność współczesnej Syberii ukształtowała się nie tylko pod wpływem czynników geofizycznych i klimatycznych, ale również jako efekt dynamiki pożarów w czasie i przestrzeni (VALENDIK 1996). Ma to tym większą wagę, że na obszarze Syberii Wschodniej, szczególnie Regionu Krasnojarskiego, zlokalizowana jest główna część najcenniejszych lasów Rosji. Mają one ogromne znaczenie nie tylko dla samej Rosji, ale także w skali ogólnoświatowej. W tym kontekście specjalnego znaczenia nabral monitoring lasów, wraz z monitoringiem zagrożenia pożarowego, który jest jego podstawowym elementem.

Ogólnokrajowe systemy oceny zagrożenia pożarowego funkcjonują w wielu krajach Europy, w USA i Kanadzie. Wykorzystują one systemy baz danych i technologię GIS (systemy informacji przestrzennej) (ROMANELLI i in. 1999; STOCKS i in. 1989; VAN WAGNER 1987; DEEMING i in. 1977). Wykorzystywane w nich parametry pogodowe pochodzą z reguły z rozwiniętych sieci stacji meteorologicznych obejmujących swym zasięgiem obszar całego kraju. Możliwość określenia zagrożenia pożarowego na podstawie danych meteorologicznych pochodzących z naziemnych stacji obserwacyjnych jest w Rosji ograniczona, gdyż za mała sieć tych stacji nie pozwala na dokonywanie interpolacji informacji pogodowych na cały obszar kraju. To sprawia, że w Rosji, a także w wielu innych krajach świata, szybko rozwijana jest technologia oceny zagrożenia pożarowego lasu na podstawie analizy zdjęć satelitarnych (AGUADO 1998; BURGAN i in. 1998; GOUZALES, CASANOVA 1995). W niniejszym artykule omówiono jedną z takich metod, opracowaną i stosowaną do oceny zagrożenia pożarowego lasu w Instytucie Leśnym im. W. N. Sukaczowa w Krasnojarsku.

2. CHARAKTERYSTYKA ZAGROŻENIA POŻAROWEGO LASÓW SYBERII WSCHODNIEJ

W latach 1991–1995 przeciętna roczna liczba pożarów na terenie Syberii Wschodniej wynosiła około 1100 (wg danych Aviolesoochrany – lotniczej służby ochrony lasów). W roku 1996 liczba ta wzrosła do około 1400, a powierzchnia pożarów wzrosła czterokrotnie: z 83 tys. ha (średnia z lat 1991–95) do przeszło 316 tys. ha. Trzykrotnie, w porównaniu z wcześniejszym pięcioleciem, wzrosła w 1996 roku także przeciętna powierzchnia pożaru. Od tego czasu datuje się uruchomienie alternatywnego względem dotychczasowej praktyki monitoringu zagrożenia pożarowego lasów Regionu Krasnojarskiego, z wykorzystaniem informacji satelitarnych. Zainstalowana stacja odbierająca dane z satelitów NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) umożliwia zbieranie i opracowywanie danych dotyczących liczby pożarów lasów i ich powierzchni. Trzeba jednakże zaznaczyć, że informacje te odbiegają niekiedy od danych oficjalnych, podawanych przez Aviolesoochranę, czego przykładem są statystyki pożarowe za rok 1996 (ryc. 1).

W Regionie Krasnojarskim stwierdzono zależność pomiędzy zagrożeniem pożarowym a warunkami pogodowymi, mikroklimatem, zróżnicowaniem siedlisk leśnych oraz gęstością zaludnienia. Według danych z różnych źródeł co 2–11 lat na tym terenie występowały okresy wzmożonej palności lasów (IVANOVA 1996; SOFRONOV, VOLOKITINA 1996). Takie sezony wzmożonej palności wystąpiły trzykrotnie w latach 1996, 1999 i 2002 (ryc. 1), kiedy dużej liczbie pożarów



Ryc. 1. Pożary lasów Regionu Krasnojarskiego w latach 1996–2002

Fig. 1. Statistic of forest fires for the Krasnojarsk Region in the years 1996–2002

towarzyszył również ich duży areal: $4 \times 10^5 - 8 \times 10^5$ ha. Można przyjąć, że w ciągu ostatniego dziesięciolecia okresy szczególnie wysokiego zagrożenia pożarowego lasów powtarzały się regularnie co 3 lata. Natomiast rok 1997, pomimo znacznej liczby odnotowanych pożarów (1107) do takich lat zaliczony być nie może, ze względu na relatywnie niższy łączny areal tych pożarów – 4×10^5 ha.

Brak wystarczających środków finansowych spowodował niedoinwestowanie wyposażenia technicznego oraz niedobór kadrowy służb ochrony przeciwpożarowej lasów i zmusił do poszukiwania alternatywnych metod prognozowania zagrożenia pożarowego. Miały one umożliwić koordynację działania odpowiednich służb, planowanie zabiegów prewencyjnych i określenie odpowiedniej strategii postępowania w sytuacjach klęskowych. Na rozległych obszarach leśnych Rosji, gdzie nie ma wystarczająco rozwiniętej sieci stacji meteorologicznych, rozwiązaniem może być wykorzystanie do celów prognostycznych i oceny zagrożenia pożarowego informacji satelitarnych. Pozwalają one na szybką i wiarygodną ocenę aktualnej sytuacji pożarowej w odniesieniu do wielkich obszarów (SUKHININ i in. 2000).

3. METODYKA OCENY ZAGROŻENIA POŻAROWEGO W ROSJI

Badania nad pożarami lasów i oceną zagrożenia pożarowego rozpoczęto w Rosji w latach 40. XX wieku (MELEKHOV 1947, NESTEROV 1949, KURBATSKI 1954). W latach 60. i 70. na obszarze Syberii i rosyjskiego Dalekiego Wschodu wiele badań przeprowadził profesor N. Kurbatski. Przedmiotem tych badań była regularność inicjowania i rozprzestrzenianie się pożarów w zależności od warunków geograficznych różnych regionów Rosji, a także właściwości fizyczne samego procesu spalania. Dla wielu obszarów Syberii zebrano materiały odnoszące się do klasyfikacji lasów, uwarunkowań pogodowych wpływających na zagrożenie pożarowe i regularność pojawiania się pożarów lasów. Sklasyfikowano leśny materiał palny, zbadano procesy schnięcia i spalania oraz metody kartowania obszarów o różnej palności.

Susza jest najważniejszym predyspozycyjnym czynnikiem pogodowym wpływającym na zagrożenie pożarowe. Może ona być określona na podstawie wilgotności dokładnego wzorca leśnych materiałów palnych. W tym celu zbadano i określono zależność korelacyjną pomiędzy warunkami pogodowymi a wilgotnością różnych materiałów palnych. NESTEROV (1949), a także VONSKI i ZHDANKO (1976) opracowali współczynniki wilgotności badając dynamikę zmian wilgotności mchu Shrebera (*Pleurozium Shreberi* Mitt.), przyjętego jako wzorcowy materiał palny. W Kanadzie do tego celu wykorzystuje się warstwę mchów oraz gleby, a w USA wzorcowym materiałem palnym jest klocek drewna, którego

wilgotność w stosunku do wilgotności pierwotnej mierzy się po 10 i 100 godzinach po ścięciu (SOFRONOV, VOLOKITINA 1996b).

Wszystkie rodzaje wskaźników zagrożenia pożarowego związanych z pogodą stosowane w Rosji składają się z dwu części: **podstawa** – którą jest wskaźnik wysychania zależny od takich parametrów pogodowych, jak: temperatura t , punkt kondensacji pary wodnej d , wilgotność powietrza h , oraz **korekty** K – określonej w zależności od wielkości opadów atmosferycznych. Zaproponowano wiele takich wskaźników dla Rosji. Początkowo, od 1949 roku, używano wskaźnika zagrożenia pożarowego opracowanego przez Nesterova, którego podstawę stanowił iloczyn $t \times h$. W 1967 roku podstawę tę zmodyfikowano do postaci: $t \times (t-d)$ oraz opracowano wskaźnik wilgotności paliwa leśnego oraz jego korektę. Część korekcyjna formuły jest jednak bardziej zmienna. O ile bowiem zagrożenie pożarowe określane jest jako suma dobowych wartości podstawy wskaźnika zagrożenia pożarowego, to w przypadku opadów, dla których wskaźnik korekcyjny K_r był mniejszy od 1 – wartość wskaźnika zagrożenia ulegała zwielokrotnieniu. Dlatego też dla wskaźnika zagrożenia pożarowego Nesterova przyjęto wartość $K_r = 0$ w przypadku opadów atmosferycznych zbliżonych do około 2,6 mm. Jednak korekta ta okazała się niewystarczająca.

Obecnie w Rosji do określania zagrożenia pożarowego stosuje się wskaźniki wilgotności paliwa (VONSKI i in. 1975). Obliczenia rozpoczyna się od momentu stopnienia śniegu i prowadzi do końca sezonu palności lasów. Stosuje się dwa wskaźniki: wilgotności ściółki leśnej ($FD1$) oraz wilgotności podłoża ($FD2$). Przyjmują one następującą postać:

$$(FD1)_n = \{(FD1)_{n-1} + t_{n-1}(t_{n-1} - \tau_{n-1})\}K_n$$

$$(FD2)_n = \{(FD2)_{n-1} \times K'_n + t_{n-1}(t_{n-1} - \tau_{n-1})K''_n$$

gdzie:

t – temperatura powietrza w godzinach 13–15 w °C,

t – temperatura punktu kondensacji pary wodnej w godzinach 13–15 w °C,

n – kolejny dzień,

K, K', K'' – wskaźniki korekcyjne.

Poniżej zamieszczono tabelę 1 przedstawiającą wartości wskaźnika korekcyjnego K w zależności od wielkości opadów atmosferycznych (ZHDANKO, GRIT-

Tabela 1
Table 1

Wskaźnik korekcyjny w zależności od wielkości opadów atmosferycznych
Correction factor values in relation to the precipitation

Opady atmosferyczne Precipitation mm	0	0,1–0,9	1,0–2,9	3,0–5,9	6,0–14,9	15,0–19,9	> 20,0
K	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0

SENKO 1980), aktualnie stosowanego w obliczeniach wskaźnika zagrożenia pożarowego lasów.

Wysokie wartości wskaźnika zagrożenia pożarowego wskazują jedynie na zagrożenie potencjalne. Aby pożar wystąpił, musi również zaistnieć czynnik inicjujący. Dlatego też do określania zagrożenia pożarowego realnego stosuje się następującą formułę:

$$\text{zagrożenie pożarowe pogodowe} \times \text{czynnik inicjujący} = \text{zagrożenie pożarowe realne}$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia czynnika inicjującego pożar zależy przede wszystkim od gęstości zaludnienia, sieci transportowej, obecności stref rekreacyjnych, itp. Oznacza to, że dla każdego regionu należy opracować odrębną klasyfikację zagrożenia pożarowego. VONSKI i in. (1975) zaproponowali, by klasy zagrożenia pożarowego określone były w zależności od udziału pożarów samoistnych: 1 klasa – do 5%, 2 klasa – do 20%, 3 klasa – do 45% i 4 klasa – do około 70%.

4. METODA OCENY ZAGROŻENIA POŻAROWEGO Z UŻYCIEM DANYCH SATELITARNYCH

Nowy kierunek monitoringu i oceny zagrożenia pożarowego rozwinął się dzięki teledetekcji satelitarnej. Dane satelitarne dostarczają wiarygodnych, precyzyjnych i weryfikowalnych informacji, przez co wzrasta efektywność i skuteczność monitoringowych systemów ochrony przeciwpożarowej lasów. Można oczekiwać, że wykorzystanie danych satelitarnych będzie wzrastać zwłaszcza w odniesieniu do:

- 1) określania wilgotności paliwa leśnego (za pomocą pasma promieniowania w podczerwieni),
- 2) wykrywania ognisk pożarów lasu,
- 3) określania stref zadymienia,
- 4) określania obszarów opadów atmosferycznych i wykrywania zachmurzenia burzowego,
- 5) klasyfikacji pożarzysk,
- 6) określania momentu topnienia śniegu, jako początku sezonu palności lasów.

W Instytucie Leśnym im. W. N. Sukaczowa opracowano specjalny algorytm pozwalający na ocenę aktualnego zagrożenia pożarowego za pomocą parametrów pogodowych otrzymanych z satelitów serii NOAA (PONOMAREV, SUKHININ 2000). Dane niezbędne do obliczenia wskaźnika zagrożenia pożarowego, takie jak temperatura powierzchni, temperatura punktu kondensacji pary wodnej, czy występowanie opadów, pozyskiwane są ze skanera AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) i sondy TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder)

Tabela 2
Table 2**Podstawowe charakterystyki skanera AVHRR**
AVHRR basic characteristics

Liczba kanałów Number of channel	5
Długości fal kanałów Middle wavelength of channels	0,6; 0,9; 3,7; 11; 12 mm
Rozdzielczość Spatial resolution	1,1 km
Szerokość pasa rejestracji Swath width	3 000 km

satelitów NOAA. Podstawowe parametry skanera AVHRR, podstawowego źródła informacji wykorzystywanych do obliczeń, przedstawiono w tabeli 2.

Nowe satelity serii NOAA, oznaczone numerami 15, 16 i 17, posiadają ponadto kanał 3^a (1,5 mm), co sprawia że skaner AVHRR cechuje się szerokim i dynamicznym zakresem oraz wysoką radiometryczną rozdzielczością pomiarów, możliwością kalibracji danych i precyzyjną nawigacją. Drugim urządzeniem, którego pomiary wykorzystywane są do obliczania zagrożenia pożarowego jest sonda TOVS. Jej przeznaczeniem są profilowe pomiary atmosfery. Sonda ta posiada 20-kanałowy mikrofalowy radiometr MSU (Microwave Sounder Unit) pozwalający na profilowe pomiary temperatury powietrza i temperatury punktu kondensacji pary wodnej, a także prędkości wiatru, koncentracji ozonu i innych charakterystyk atmosfery. Należy w tym miejscu podkreślić, że właściwości stosowanych urządzeń, szerokość pasa rejestracji pomiarów, rozdzielczość terenowa oraz regularność transferu danych w pełni odpowiada wymogom efektywnego systemu monitorowania zagrożenia pożarowego (ryc. 2). Umożliwiło to opracowanie w latach 1996–2001 metody kartowania zagrożenia pożarowego z użyciem danych pochodzących z satelitów NOAA. Wskaźnik zagrożenia pożarowego jest w tym przypadku określany według wzoru analogicznego do formuły Nesterova, używanej w Rosji do oceny zagrożenia pożarowego na podstawie danych pogodowych:

$$FD_{ij} = \sum_i a_i \xi_i \sum_j t_{ij} (t_{ij} - \tau_{ij})$$

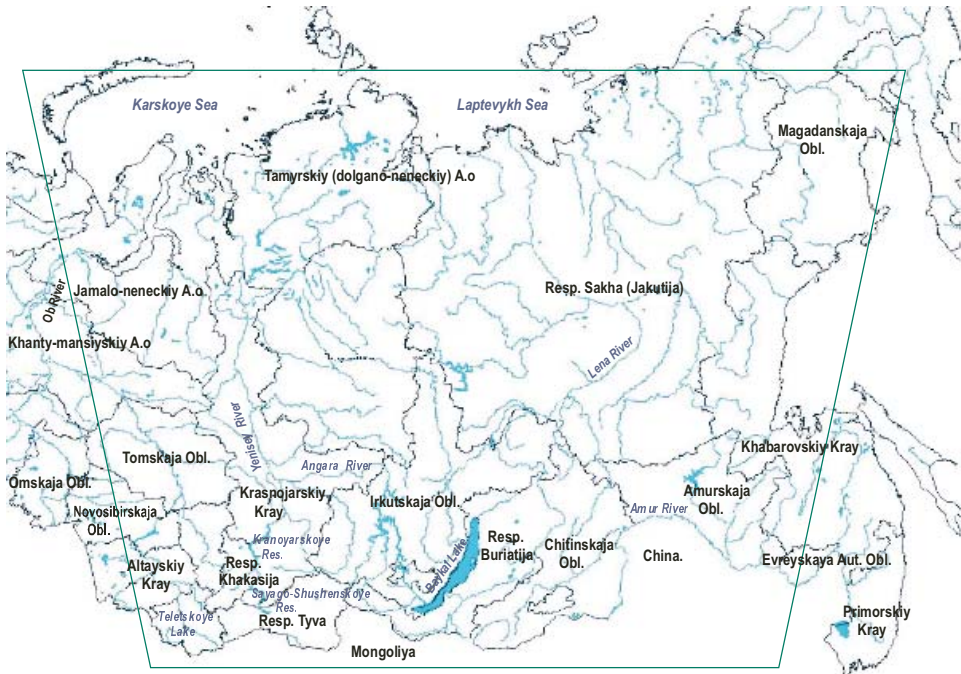
$$a = \left(\frac{A_3 - A_1}{A_3 + A_1} \cdot \frac{A_2 + A_1}{A_2 - A_1} \right)_{NOAA-16}$$

gdzie:

FD_{ij} – wskaźnik zagrożenia pożarowego,

◆ – temperatura (°C) punktu kondensacji pary wodnej z sondy TOVS,

t – temperatura (°C) powierzchni na podstawie danych radiometru AVHRR,



Ryc. 2. Azjatycka część Rosji oraz zasięg obserwacji prowadzonych przez krasnojarską stację odbiorczą satelitów NOAA

Fig. 2. Asian part of Russia and the Krasnoyarsk NOAA-satellite receiving station observing zone

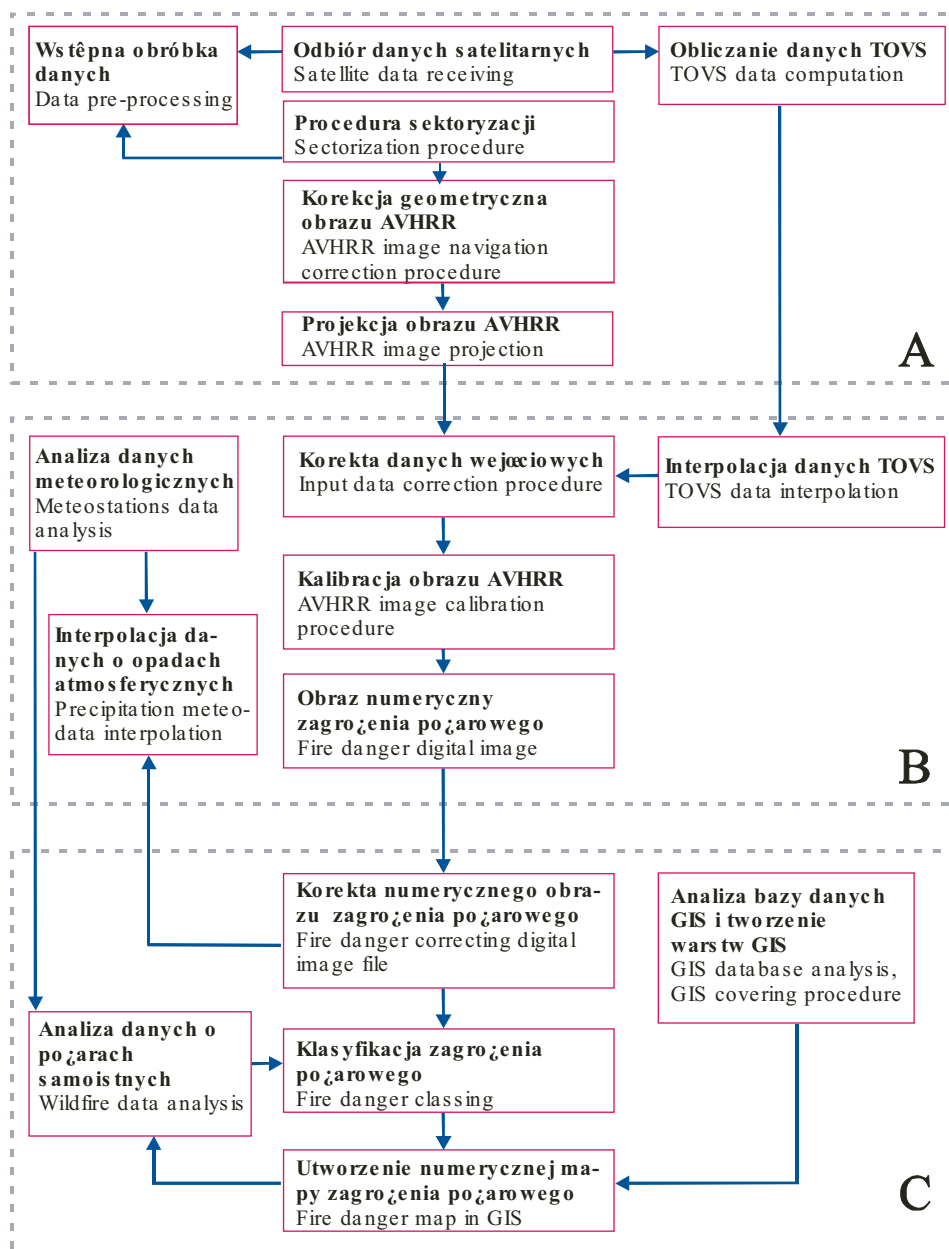
x – wskaźnik opadów atmosferycznych otrzymany na podstawie informacji pogodowych sondy TOVS i bazy danych GIS „Meteo”,

A_n – albedo dla kanałów AVHRR o numerach 1 i 2 oraz 3^a z satelity NOAA-16,

a – wskaźnik korelacyjny.

Obliczenia dokonywane są dla każdego piksela na obrazie (i) dla każdego dnia (j) w sezonie palności lasów.

Technologia tworzenia map zagrożenia pożarowego obejmuje trzy niezależne fazy (ryc. 3). Faza pierwsza – wstępnej obróbki danych, składa się z odbioru i zapisu sygnałów satelitarnych, kalibracji danych radiometrycznych, sektoryzacji polegającej na wyborze określonych scen (obrazów satelitarnych) i kombinacji kanałów skanera AVHRR, korekty geograficznej obrazu satelitarnego i projekcji kartograficznej. Do określenia wskaźnika zagrożenia pożarowego służą trzy kanały AVHRR – pierwsze dwa odzwierciedlające powierzchniowe albedo oraz kanał piąty (podczerwień termalna), pozwalający na wyznaczenie temperatury widzialnych powierzchni. Analiza kanałów widzialnych oraz podczerwieni umożliwia wskazanie rejonów zasłoniętych chmurami i pokrytych wodą – obszary te wyłącza się z dalszych analiz. Faza ta umożliwia również wprowadzanie korekt wskaźnika



Ryc. 3. Diagram opracowywania map zagrożenia pożarowego lasów. A – odbiór i wstępne opracowywanie danych satelitarnych, B – korekcja i analiza zdjęć satelitarnych, C – opracowanie map zagrożenia pożarowego

Fig. 3. The technology of fire danger map generation. A – preliminary data processing, B – software was developed, C – weather fire danger mapping in GIS

zagrożenia pożarowego związanych z informacjami o opadach atmosferycznych pochodzącymi z naziemnych stacji meteorologicznych.

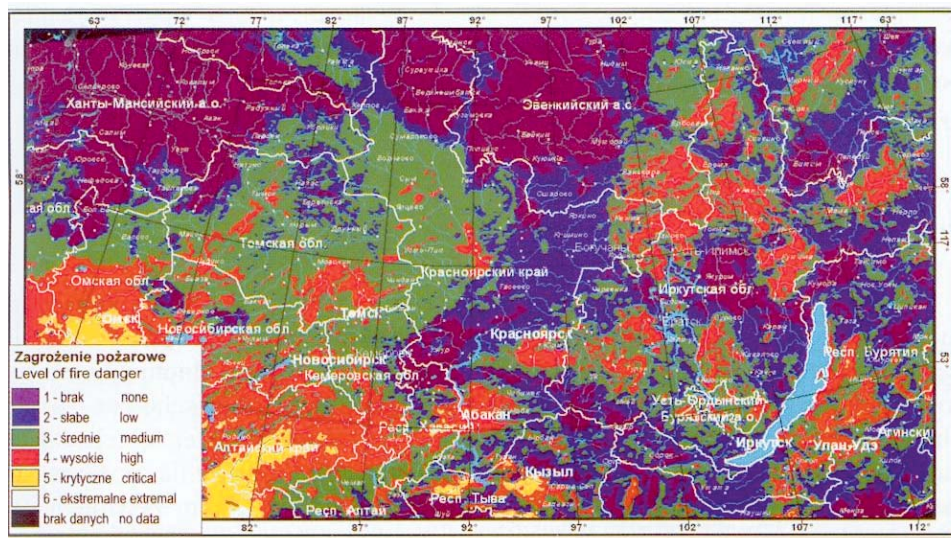
Druga faza obejmuje obliczenia odnoszące się do wszystkich pikseli na wszystkich uwzględnionych zobrazowaniach satelitarnych. Zastosowane do tego celu oprogramowanie umożliwia traktowanie tych zobrazowań jako jednego obrazu o określonym odwzorowaniu kartograficznym i w efekcie pozwala na codzienną aktualizację mapy rozkładu przestrzennego wskaźnika zagrożenia pożarowego lasów. Do określenia charakterystyk dolnych warstw atmosfery wykorzystywane są parametry radiometryczne powierzchni uzyskane z satelity, zamiast aktualnych, rzeczywistych danych meteorologicznych. Stwierdzono przy tym statystycznie istotną zależność korelacyjną pomiędzy radiometrycznymi parametrami satelitarnymi i danymi meteorologicznymi, co wskazuje na zasadność obliczania wskaźnika zagrożenia pożarowego na podstawie danych teledetekcyjnych.

Wyposażenie satelity NOAA-16 umożliwia określanie wilgotności powierzchni nie zasłoniętych przez chmury. Pozwala to na obliczenie wskaźnika korekcyjnego (a) odzwierciedlającego zarówno stan roślinności (dane z kanałów 1 i 2 skanera AVHRR), jak i wilgotność powierzchni (dane z kanału 3^a skanera AVHRR/NOAA-16).

Ponieważ chmury nie są transparentne dla promieniowania podczerwonego rejestrowanego przez skaner AVHRR, dane radiometryczne z obszarów zachmurzonych są niedostępne dla obliczeń. Dlatego, by rozwiązać ten problem, zaproponowano wykorzystywanie danych z sondy NOAA/TOVS. Zakres mikrofal mierzony przez instrument TOVS pozwala na określenie parametrów wilgotności i temperatury powietrza rejonów zasłoniętych przez chmury. Z uwagi na sposób odwzorowania danych TOVS, jako nieregularnej sieci punktów do interpolacji wartości parametrów uzyskanych dla dowolnych punktów obrazu NOAA stosuje się metodę aproksymacji liniowej. Przy użyciu danych TOVS, za pomocą liniowej ekstrapolacji trzech najbliższych położonych punktów, można określić wartość danego parametru dla każdego miejsca na obrazie NOAA.

Stwierdzono występowanie silnego związku korelacyjnego pomiędzy temperaturą określoną za pomocą pomiarów satelitarnych i zmierzoną w naziemnych stacjach meteorologicznych. Współczynnik korelacji był wysoki ($r=0,75$), a przeciętne odchylenie temperatury określonej za pomocą pomiarów TOVS od zarejestrowanej w stacjach meteorologicznych wynosiło 4–6 °C. Odchylenie to brane było pod uwagę przy przeliczaniu danych satelitarnych i dopiero takie skorygowane dane sondy TOVS uwzględniano do określenia wskaźnika zagrożenia pożarowego (PONOMAREV, SUKHININ 2001; SUKHININ i in. 1999).

W fazie trzeciej, ostateczny produkt – mapa zagrożenia pożarowego tworzona jest z wykorzystaniem oprogramowania GIS (ArcView 3.2). Poszczególne klasy zagrożenia wyznaczane są w odniesieniu do zakresu obliczonych wartości wskaźnika zagrożenia pożarowego (ryc. 4). Dalsze prace w tej fazie polegają na tworzeniu uzupełniających danych obejmujących informacje o leśnym materiale palnym, przez co możliwe jest określenie potencjalnego zachowania się i rozwoju



Ryc. 4. Numeryczna mapa zagrożenia pożarowego opracowana na podstawie danych satelitarnych NOAA dla Syberii Wschodniej na dzień 8.08.2000 r.

Fig. 4. Digital map of fire danger generated on the NOAA-satellite data for Eastern Siberia on 8th of August, 2000

pożarów oraz tempa wypalania lasu. Mapy tego rodzaju stanowią użyteczną pomoc w akcjach przeciwdziałania i gaszenia pożarów.

Użyteczność każdego systemu monitorowania zagrożenia pożarowego lasów określana jest przez zdolność tego systemu do przewidywania występowania pożarów samoistnych oraz ich charakterystyki. Przyszłe zagrożenie pożarowe może być określane z pomocą krótkoterminowych prognoz meteorologicznych. Takie prognozy pogody, obejmujące temperaturę powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne w horyzoncie czasowym 12–168 godzin, dostępne są jako część ogólnoświatowej bazy danych GIS „Meteo”.

Wyniki badań umożliwiają sporządzenie map prognostycznych pokazujących górną granicę zagrożenia pożarowego (tzn. maksymalne wartości wskaźnika zagrożenia pożarowego przy całkowitym braku opadów) na następne 7 dni. Jedynym problemem przy tego typu prognozach jest brak dokładnej wiedzy o opadach atmosferycznych w ciągu okresu objętego prognozą – rozwiązuje się go interaktywnie i w sposób ciągły aktualizując mapę zagrożenia pożarowego przy wykorzystaniu danych o opadach z naziemnych stacji meteorologicznych.

W okresie 1996–2001 pozyskano i przeanalizowano dane z 15 naziemnych stacji meteorologicznych zlokalizowanych w Regionie Krasnojarskim. Współczynnik korelacji pomiędzy zaproponowanym wskaźnikiem zagrożenia pożarowego określonym na podstawie danych satelitarnych a wskaźnikiem obliczonym według formuły Nesterova ($r \gg 0,9$) i wskaźnikiem zagrożenia pożarowego BUI (Buildup Index) stosowanym w kanadyjskim systemie ochrony przeciwpożar-

rowej lasów ($r \gg 0,8$) okazał się bardzo wysoki. Wskazuje to na użyteczność zaproponowanej metody wykorzystania danych satelitarnych do określania zagrożenia pożarowego na obszarach Rosji pozbawionych infrastruktury meteorologicznej.

5. PODSUMOWANIE

Rozwój monitoringu pożarowego opartego na technologii GIS i wykorzystującego dane satelitarne staje się obecnie, w związku z intensyfikacją użytkowania zasobów naturalnych Syberii, bardzo istotnym zagadnieniem. Odnotowywana corocznie ogromna liczba pożarów lasów na rosyjskim Dalekim Wschodzie jest pochodną zarówno czynników naturalnych, jak i aktywności ludzkiej. W tej sytuacji zastosowanie nowoczesnego systemu monitorowania zagrożenia pożarowego lasów pozwoli na opracowanie strategii operacyjnej walki z tym żywiołem i w efekcie doprowadzi do ograniczenia w lasach Syberii liczby i rozmiaru najgroźniejszych pożarów.

Czynniki przyrodnicze i geograficzne Syberii determinują wykorzystanie teledetekcji satelitarnej w monitoringu lasów. Takie podejście jest realizowane obecnie w wielu krajach europejskich i w Ameryce Północnej, równoległe z udoskonalaniem tradycyjnych, naziemnych metod monitoringowych. Jednakże w Rosji, a szczególnie na obszarze Syberii, rozwój odpowiedniej sieci stacji meteorologicznych jest niemożliwy z powodu wysokich kosztów i małej gęstości zaludnienia. Dlatego teledetekcja satelitarna wydaje się być właściwym źródłem informacji dla monitoringu leśnego opartego na systemach informacji przestrzennej. Przykład systemu monitoringu leśnego, a konkretnie monitoringu zagrożenia pożarowego lasów, obejmującego ocenę i prognozę zagrożenia i wykorzystującego dane z satelitów serii NOAA, jest prezentowany w niniejszym opracowaniu. Po raz pierwszy zaproponowano przy tym użycie danych satelitarnych obejmujących kanały termalne. Charakterystyka techniczna urządzeń rejestrujących informacje wykorzystywane następnie w obliczeniach w pełni odpowiada wymogom przeciwpożarowego systemu monitoringowego, można zatem dane te uznać za podstawową warstwę informacyjną GIS. Proponowana metoda wykorzystuje dane radiometryczne pasm termalnych skanera AVHRR, na podstawie których określano palność materiałów leśnych. Opracowano również oryginalne oprogramowanie komputerowe, pozwalające na przetwarzanie danych satelitarnych i codzienne generowanie map zagrożenia pożarowego, co stanowi warstwę operacyjną systemu monitoringu lasu w GIS. Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono wysoką zgodność uzyskanych wyników z ocenami zagrożenia pożarowego określanymi tradycyjnie na podstawie danych naziemnych, zarówno w Rosji, jak i za granicą.

Zaproponowana metoda jest efektywna i tania. Pozwala na określanie zagrożenia pożarowego odległych obszarów bez potrzeby rozwijania sieci na-

ziemnych stacji meteorologicznych. Może być ponadto uzupełniana o nowe warstwy informacyjne. Pozwala to na dalsze udoskonalanie wskaźnika oceny zagrożenia pożarowego, uwzględniającego na przykład ocenę energii pożaru.

(tłum. P. L.)

Praca została złożona 15.12.2002 r. i przyjęta przez Komitet Redakcyjny 10.09.2003 r.

TECHNOLOGY OF DAILY WEATHER FIRE DANGER ESTIMATION BY MEANS OF SATELLITE REMOTE SENSING IN KRASNOYARSK REGION (RUSSIA)

Summary

Devastating forest fires associated with long draughts have become very common over recent decades in some parts of Siberia and the Russian Far East. This forces to increase the level of forest protection and especially to develop sound fire protection monitoring system. Satellite remote sensing can provide reasonable estimates of fire danger across Russia what is extremely important for areas without adequate network of on-ground meteorological stations, such as the territory of Siberia. In the V. N. Sukachev Institute of Forest (Krasnoyarsk, Russia), such fire protection monitoring system based on satellite data was developed. An original algorithm has been invented to assess the current fire danger by means of weather conditions derived from NOAA-series satellites. System consists also of three stage procedure of fire danger map generation. In the first stage preliminary data processing is done. In the second data computation and calibration lead to generation of geographically corrected image of fire danger index. In the last stage the maps of fire danger spatial pattern are generated daily over the Eastern Siberia region with the use of GIS technology. Additional layers of information might be added, as for example the short-term weather forecast, to allow on prediction of forest fire danger up to seven days.

PIŚMIENNICTWO

- AGUADO I., CHUVIECO E., CAMARASA A., MARTIN P., CAMIA A. 1998. Estimation of meteorological Fire Danger Indices From Multitemporal Series of NOAA-AVHRR Data. III International Confer. on Forest Fire Research /14th Conference on Fire and Forest Methodology. Coimbra, I: 1131–1147.
- AMIRO B. D., STOCKS B. J., ALEXANDER M. E., FLANNIGAN M. D., WOTTON B. D. 2001. Fire, climate change, carbon and fuel management in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 3-4: 405–413.
- BURGAN R. E., KLAVER R. W., KLAVER J. M. 1998. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *Int. J. Wildland Fire*, 8(3): 159-170.
- DEEMING J. E., BURGAN R. E., COHEN J. D. 1977. The National Fire-Danger Rating System - 1978. Gen. Tech. Rep. INT-39. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 63 pp.

- GOUZALEZ A. F., CASANOVA J. 1995. Forest fire risk estimation in the community of Valencia during the summer of 1994 using NOAA/AVHRR images. Proc. International Workshop Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management. – Spain, University of Alcalá de Henares: 104–106.
- IVANOVA G. A. 1996. Extremal fire danger seasons in the forests of Evenkija. Siberian Ecological Magazine, 3: 29–34.
- KURBATSKI N. P. 1954. Methodical guideline of local fire danger scale development. Leningrad, LenNILH: 33 p.
- MELEKHOV I. S. 1947. Forest nature and forest fires. Arkhangelsk: 60.
- NESTEROV V. G. 1949. Forest fire danger and methods of assessment. Moscow, Leningrad: 74 p.
- PONOMAREV E. I., SUKHININ A. I. 2000. Technology of the complex fire danger estimation and forest fire characteristics forecasting in GIS. Computing Technology Magazine. Novosibirsk, vol. 5: 58–68.
- PONOMAREV E. I., SUKHININ A. I. 2001. Usage of NOAA-satellites data for spatial fire danger estimation in forested territories. Siberian Ecological Magazine, 5: 577–589.
- ROMANELLI S., MASELLI F., BOTTI L., ZIPOLI G. 1999. Evaluation of forest fire risk in Tuscany (central Italy) by use of GIS and satellite data. Proceedings Remote Sensing and Forest Monitoring. Rogow, Poland, p. 605.
- SHVIDENKO A., GOLDAMMER J. G. 2001. Fire Situation in Russia. International Forest Fire News, 24: 41–59.
- SOFRONOV M. A., VOLOKITINA A. V. 1996a. Forest fires in northern sparse growth of trees zone. Siberian Ecological Magazine, 3: 43–49.
- SOFRONOV M. A., VOLOKITINA A. V. 1996b. Canadian system of forest fire danger estimation. Moscow, VNIITSLesresurs: 2–22.
- STOCKS B. J., LAWSON B. D., ALEXANDER M. E., VAN WAGNER C. E., MCALPINE R. S., LYNHAM T. J., DUBE D. E. 1989. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview. For. Chron., 65, 6, pp. 450.
- SUKHININ A., KASHKIN V., PONOMAREV E. 1999. Monitoring Forest Fire in Eastern Siberia from Space. Tomsk: Proceeding of SPIE, 3983: 206–214.
- SUKHININ A., CAHOON D., STOCKS B. 2000. Remote sensing of forest fire in Siberia using NOAA information. Remote Sensing and Forest Monitoring. Rogow, Poland: 595–596 pp.
- VAN WAGNER C.E. 1987. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., For. Techn. Rep. 35., Chalk River, Ontario: 37 p.
- VALENDIK E. N. 1996. Ecological aspects of forest fire in Siberia. Siberian Ecological Magazine, 3, 1: 1–8.
- VALENDIK E. N., IVANOVA G. A. 2001: Fire regimes in the forest of Siberia and the [Russian] Far East. Lesovedenie, 4: 69–76.
- VONSKI M. V., ZHDANKO V. A. 1976. The foundations of weather fire danger indices development. Leningrad, LenNILH: 48 p.
- VONSKI S. M., ZHDANKO V. A., KOR BUT V. I., SEMENOV M. M., TETUSHEVA L. V., ZAVGORODNIA L. S. 1975. Working up and adaptation of local forest fire danger scales. Leningrad, LenNILH: 57 p.
- ZHDANKO V. A., GRITSENKO M. V. 1980. Forest fire danger seasons analysis technique. ðàððà òàèèçà èäññæäðïð ñàçññâ. Practical recommendation. Leningrad, LenNILH: 37 p.