

Evgenij I. PONOMAREV¹, Valerij A. IVANOV², Viačeslav A. BYČKOV¹

WIELKIE POŻARY W LASACH WSCHODNIEJ SYBERII I ICH WPŁYW NA PROCES TWORZENIA SIĘ LOKALNYCH CHMUR BURZOWYCH

LARGE-AREA FOREST FIRES IN THE EASTERN SIBERIA
AND THEIR INFLUENCE ON PROCESS
OF LOCAL STORM CLOUDS FORMATION

***Abstract.** In this paper, analysis of fire regimes in forest of Krasnojarskiy kray (Eastern Siberia) is presented. Spatio-temporal superposition of large forest wildfires and lightning data were analyzed. Question of fire cloud forming due to large forest fires was considered. And 'positive feedback' in the system of large wildfire – lightning – forest fire was discussed.*

***Key words:** Forest wildfire, lightning, fire cloud, geographical informative system (GIS).*

¹ Institut lesa im. V.N. Sukačeva SO RAN, 660036, Krasnojarsk, Akademgorodok, tel.: (3912) 49-40-92, e-mail: evg@ksc.krasn.ru, ponomarev@wp.pl

² Sibirskij gosudarstvennyj technologičeskij universitet, 660049, Krasnojarsk, pr. Mira, 82.

WSTĘP

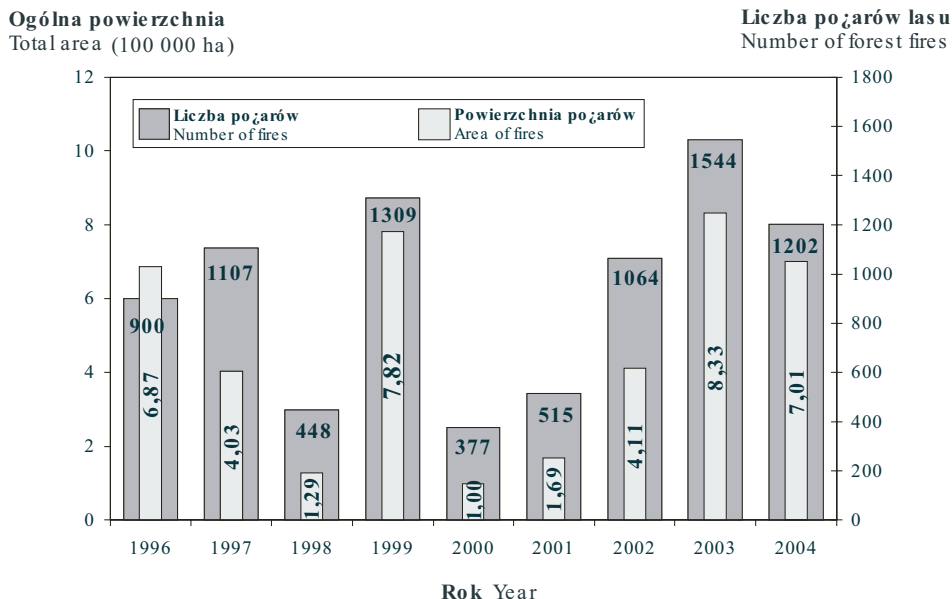
Wielkie pożary lasu wywołują negatywne skutki w biogeocenozach leśnych, powodują znaczące straty ekonomiczne, a także oddziałują na procesy zachodzące w atmosferze. Do atmosfery emitowane są przede wszystkim produkty spalania (gazy i aerozole). Na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych oceniono, że średnia koncentracja emisji pożarowych może 1000-krotnie przewyższać średnią koncentrację aerozoli w czystej atmosferze (Kucenogij i in. 2003). Nad terytorium objętym pożarem powstaje potężna konwekcyjna kolumna dymów (tzw. tren), która może wznosić się na wysokość 3–5 km, sprzyjając tworzeniu się obłoku pożarowego, w którym zachodzą wyładowania atmosferyczne. Zjawisko tworzenia się obłoku pożarowego opisali m.in. Latham i in. 1991, 2001, Lyons i in. 1998, Vonnegut i Orvill 1998, Vonnegut i in. 1995.

Analizując te informacje można przypuszczać, że częste w Syberii Wschodniej wielkoobszarowe pożary lasu w pewnych warunkach wywołują silny efekt zależności zwrotnej, tzn. powstający w wyniku pożaru lasu obłok pożarowy, będący źródłem wyładowań atmosferycznych, staje się przyczyną kolejnych zapaleń w lasach. W pracy podjęto analizę wpływu wielkoobszarowych pożarów leśnych na proces powstawania burz wewnątrzmasowych (wewnątrz jednorodnej masy powietrza) i wyładowań atmosferycznych.

OPIS TERENU BADAŃ

Terenem badań był obszar środkowego biegu rzeki Angara (północno-wschodni rejon Okręgu Krasnojarskiego), na północy ograniczony wododziałem między rzekami Podkamenną Tunguską i Angarą, na południu – odnogami gór Wschodniego Sajanu, na zachodzie – Jenisejskim pasmem górskim, a na wschodzie – górami Przybajkała. Sezon pożarowy zaczyna się tu w drugiej dekadzie maja i trwa do września. W tym okresie dominuje cyrkulacja powietrza charakterystyczna dla cyklonów, które nadchodzą z południa i południowego zachodu. Jednak w czerwcu i lipcu przeważają antycyklony, którym towarzyszą susze, będące efektem napływu suchego powietrza z Mongolii i północno-wschodnich Chin. W rejonach zachodnich jest nieco wyższa wilgotność dzięki południkowemu położeniu Jenisejskiego pasma górskiego. Z zachodu na wschód wzrastają wskaźniki klimatu kontynentalnego (Lapšin i in. 1971). Stacja meteorologiczna znajduje się w osadzie Bogučany – administracyjnym centrum rejonu.

Powtarzające się corocznie wielkopowierzchniowe pożary lasu to jedna z osobliwości Syberii Wschodniej. Pożary te mogą obejmować swym zasięgiem dziesiątki tysięcy hektarów lasu. W 2003 r., w wyniku zdalnego monitorowania na terytorium Okręgu Krasnojarskiego (Wschodnia Syberia) odnotowano 23 wielko-



Ryc. 1. Liczba i powierzchnia pożarów lasu na terytorium Okręgu Krasnojarskiego w latach 1996-2004 (dane z monitoringu satelitarnego)

Fig. 1. Number and area of forest fires in Krasnoyarskiy kray in 1996-2004 (satellite monitoring data)

obszarowe pożary lasu (powierzchnia każdego z nich przewyższała 3000 ha), a w 2004 r. – 18 (ryc. 1).

OCENA ŹRÓDEŁ DANYCH

W pracy porównano przestrzenno-czasowy rozkład wyładowań atmosferycznych i wielkoobszarowych pożarów lasu odnotowanych w 2003 r.

Bazę danych o wielkoobszarowych pożarach lasu uzyskano z Instytutu Lasu Syberyjskiego Oddziału Rosyjskiej Akademii Nauk (Krasnojarsk) na podstawie zdjęć uzyskanych z satelitów serii NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration Polar Operational Environmental Satellites/Advanced Very High Resolution Radiometer). Dane o pożarach leśnych i błyskawicach na terytorium Okręgu Krasnojarskiego są przedstawiane jako warstwy informacyjne systemu geoinformacji (GIS) monitoringu pożarów lasu. Obecnie dostępna jest statystyka tych pożarów dla całego terytorium azjatyckiej części Rosji z lat 1996–2004.

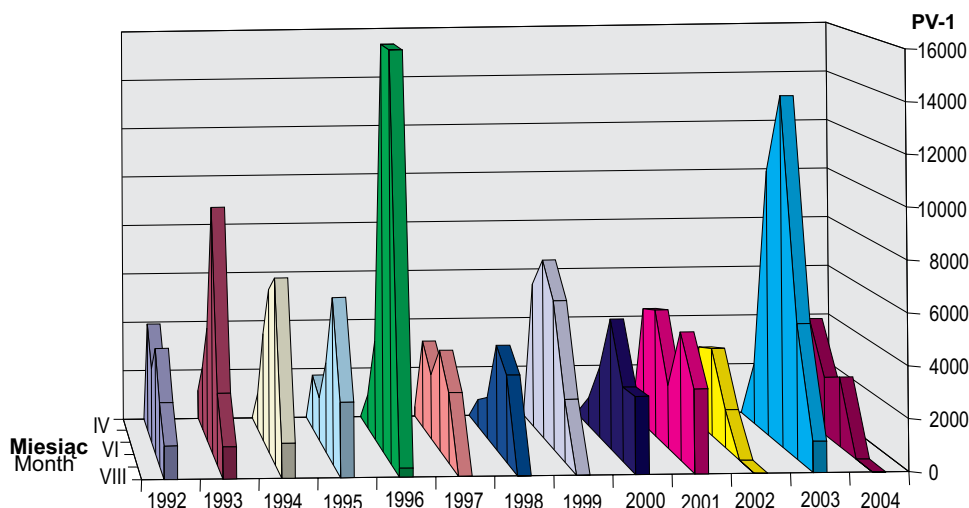
Wcześniej zweryfikowano możliwości wykrywające radiometru AVHRR porównując je z rezultatami doświadczeń podsatelitarnych. Okazało się, że prawdopodobieństwo wykrycia pożarów o powierzchni większej od 50 ha wynosi

więcej niż 80% w warunkach bezchmurnych, choć przy zadymionej atmosferze. Pożary mniejsze od 50 ha wykrywane są z prawdopodobieństwem mniejszym niż 45% (Sukhinin i in. 1999). Statystyka małowymiarowych ognisk spalania została wykonana przez lotniczą służbę ochrony przeciwpożarowej lasów w Krasnojarsku (Avialesoochrana).

Dane o przestrzenno-czasowym rozmieszczeniu wyładowań atmosferycznych są dostępne dzięki stworzonemu w 1997 r. Systemowi Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych (SRWA), którego jedno z centrów znajduje się w Krasnojarsku. Analiza danych statystycznych z lat 2000–2001 wykazała, że błąd przy określaniu miejsca ponownych wyładowań atmosferycznych wynosi 1–20 km, co jest wystarczające na potrzeby lotniczej służby ochrony przeciwpożarowej lasu.

WYNIKI

Na terytorium badanego rejonu najczęściej zdarzają się ekstremalne okresy pożarowe. Dynamikę zagrożenia pożarowego w rejonie stacji meteorologicznej Bogučany przedstawiono na rycinie 2. Na tym terytorium, z powodu jego właściwości klimatycznych i rozległości występujących tu kompleksów leśnych, najwyższa, piąta klasa zagrożenia pożarowego występuje, gdy wskaźnik zagrożenia pożarowego (PV-1) określony na podstawie wilgotności ściółki leśnej i podłoża przekracza 3500 jednostek (Vonskij i in. 1975; Ponomarev 2003). Wartość ta była przekraczana także wcześniej, w latach 1993, 1996 i 2003 (ryc. 2). W analizowanym roku 2003 wskaźnik zagrożenia pożarowego przewyższał wartość



Ryc. 2. Dynamika zagrożenia pożarowego w latach 1992–2004 (dane stacji meteorologicznej Bogučany, Okręg Krasnojarski)

Fig. 2. Forest fire risk dynamics in 1992–2004 (data of Bogučany meteo station, Krasnojarskiy kraj)

13 789 jednostek w okresie od 1 czerwca do 12 lipca, natomiast w okresie od 29 lipca do 10 sierpnia osiągnął maksimum okresowe 5232 jednostek (w dniu 3 sierpnia).

W dniach 2–6 sierpnia 2003 r., za pomocą systemu monitoringu satelitarnego, odnotowano dwa wielkie pożary lasu, rozprzestrzeniające się z dużą intensywnością (ryc. 3), którym towarzyszyło powstanie obłoków dymu (ryc. 4).

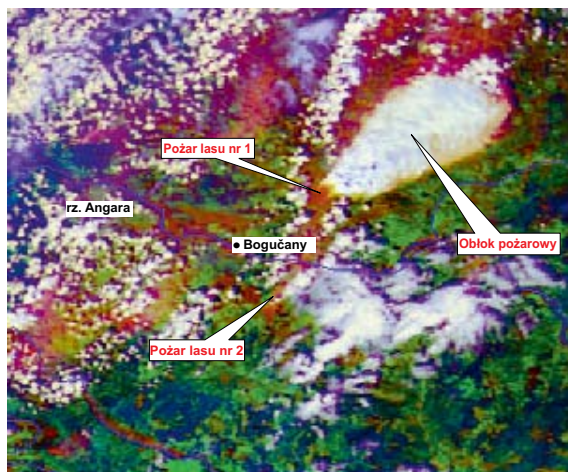
Na podstawie obróbki serii zdjęć z satelitów NOAA odtworzono dynamikę powierzchni spalania płomieniowego podczas obserwowanych pożarów (ryc. 5).

W przypadku pożaru nr 1 powierzchnia spalania płomieniowego w szczytowym momencie jego rozwoju wynosiła 7376 ha, natomiast w tym samym czasie powierzchnia spalania płomieniowe pożaru nr 2 wynosiła 2254 ha.

Oba pożary przebiegały w podobnych warunkach geofizycznych, leśno-typologicznych i meteorologicznych. Jednakże odnotowano istotne różnice w powierzchni spalania płomieniowego, co przełożyło się na ilość produktów spalania wydzielonych do atmosfery i moc cieplnego prądu konwekcyjnego.

Ryc. 3. Obłok pożarowy, zdjęcie z satelity NOAA-16, 3.08.2003 r.

Fig. 3. Fire cloud, NOAA-16 satellite photo, Aug 3, 2003.



Ryc. 4. Obłoku dymu nad pożarem z dnia 3.08.2003 r. (fot. D. A. Selin, Arch. Lotniczej Służby Ochrony Lasów w Krasnojarsku)

Fig. 4. Fire cloud over burning area, Aug 3, 2003 (phot. D. A. Selin, Air-Service of Forests Protection in Krasnojarsk)



Ilość wydzielających się produktów spalania można przedstawić w postaci funkcji:

$$M = f(M_{LMP}, \eta, PV - I, V_{LMP}),$$

gdzie:

M – ogólna masa substancji wydzielających się do atmosfery, jako produktów spalania,

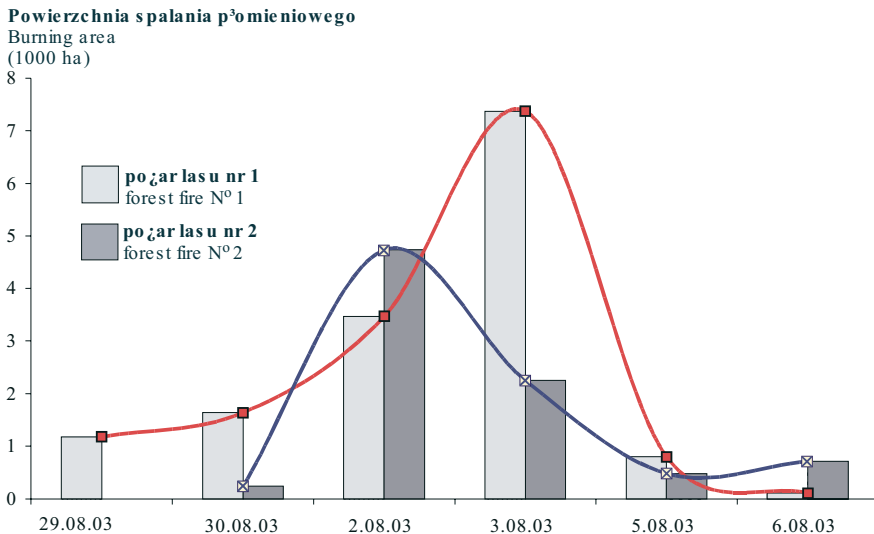
η – współczynnik niedopalenia (niecałkowitego spalania),

$PV-I$ – współczynnik zagrożenia pożarowego, określony na podstawie warunków meteorologicznych,

M_{LMP} – ilość spalonego leśnego materiału palnego (LMP).

Szybkość rozprzestrzeniania się, intensywność oraz inne charakterystyki pożaru w dużym stopniu zależą od właściwości materiałów palnych, ich ilości, struktury, wilgotności i składu chemicznego (Valendik i in. 2000). Zbiór tych parametrów oznaczono jako V_{LMP} .

Różnica powierzchni płomieniowego spalania pożaru nr 1 i 2 wynika z różnej struktury i różnego zapasu leśnego materiału palnego (LMP) na obszarach nimi objętych. Pożar nr 1 powstał na pożarzysku z 1996 r., z wywrotami drzew po pożarze na części powierzchni, co wpłynęło na wysokie obciążenie ogniowe, wyrażone masą materiału palnego na 1 ha (do 120 t/ha), a w następstwie na szybkość rozprzestrzeniania się ognia i intensywność spalania. Powierzchnia spalania płomieniowego w dniach 2–3 sierpnia zwiększyła się ponad 2-krotnie (ryc. 5). Pożar nr 2 rozprzestrzenił się na terenie, przez który ogień przeszedł dwa razy: w roku 1996 i 2002, dlatego mniejszy był tu zapas leśnych materiałów palnych (obciążenie ogniowe wynosiło ok. 10 t/ha), a w konsekwencji mniejsza



Ryc. 5. Dynamika zmian powierzchni spalania podczas pożaru nr 1 i 2

Fig. 5. Dynamics of burning area changes during forest fire no 1 and no 2 existences

intensywność spalania niż w przypadku pożaru nr 1. Zdaniem autorów właśnie te czynniki miały decydujący wpływ na formowanie się obłoku pożarowego.

MECHANIZM TWORZENIA SIĘ OBŁOKU POŻAROWEGO

Burze nieodłącznie są związane z rozwojem potężnych kłębiasto-deszczowych chmur, w których mogą zachodzić procesy wyładowań elektrycznych w postaci błyskawic w chmurach, między chmurami, a także między chmurami i Ziemią (Kravčenko 1982). Czasami burzom nie towarzyszą opady atmosferyczne – wtedy są one najbardziej niebezpieczne, gdyż wyładowania atmosferyczne mogą stać się przyczyną pożarów leśnych.

Do powstawania chmur burzowych konieczna jest obecność wilgotnych i ciepłych mas zmiennego powietrza. Z nich – przy ich wznoszeniu się do góry – mogą tworzyć się potężne chmury burzowe (Kravčenko 1982, Roll 1965, Puzdrečenko 1978). Przy nierównomiernym nagrzewaniu się przyziemnej warstwy powietrza od podścielającej powierzchni, prawdopodobne jest formowanie się chmur konwekcyjnych i możliwe są burze wewnątrzmasowe lub ciepłe. Zdaniem autorów właśnie taki był mechanizm formowania się obłoku pożarowego zaobserwowanego nad pożarem nr 1 (ryc. 3, 4).

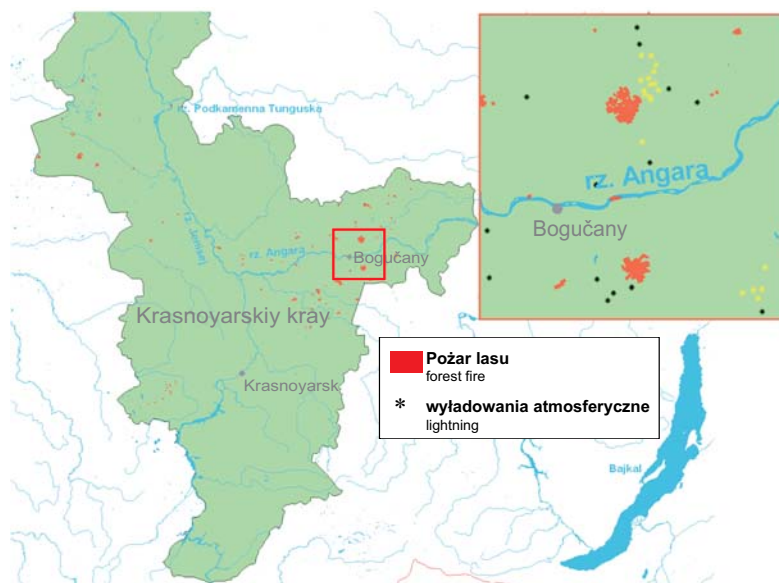
Dla utworzenia się każdej chmury konieczne jest spełnienie dwóch podstawowych warunków: w atmosferze musi być nadmiar pary wodnej, swobodnie docierającej do formującego się obłoku, oraz muszą być obecne jądra kondensacji. Rolę takich jąder mogą pełnić: pył, cząsteczki powstałe wskutek erozji pokrywy gleby, soli, a także produkty spalania (Kirjuchin i Krasnikov 1963).

Ilość pary wodnej powstałej w trakcie pożarów zależy od warunków pogodowych (tab. 1). Z danych literaturowych wynika, że zapasy wody chmur kłębiasto-deszczowych sięgają 10^4 – 10^6 ton (Šmeter 1972). Analizując dane tabeli 1 można zauważyć, że wraz ze wzrostem klasy zagrożenia pożarowego (KZP) rośnie stopień wypalenia LMP (do 74%), a ilość wydzielającej się wody sięga od 5,6 do 15,6 t/ha. A zatem ilość wody nieodzownej do utworzenia się obłoku pożarowego

Tabela 1. Ilość wody wytworzonej w wyniku spalania naziemnych leśnych materiałów palnych (LMP) w trakcie pożarów eksperymentalnych

Table 1. Quantity of water formed as consequence of forest fuel burning during experimental fires

Klasa zagrożenia pożarowego Fire risk class	Obciążenie ogniowe (zapas LMP) Forest fuel	Spalona część zapasu Share of burned biomass	H ₂ O
	t/ha	%	t/ha
2	41,0	26,1	5,6
3	62,0	21,7	6,2
4	64,0	29,2	6,4
5	41,0	74,1	15,6



Ryc. 6. Rozmieszczenie pożarów i wyładowań atmosferycznych 2-7 sierpnia 2003 r.: 1 i 2 - centra pożarów, żółtym kolorem zaznaczono błyskawice odnotowane 3 sierpnia 2003 r.

Fig. 6. Location of fire areas (1 and 2) and lightnings in Aug 2-7, 2003 (lightnings recorded in Aug 3, 2003 are in yellow)

wydziela się w trakcie pożaru o powierzchni spalania płomieniowego powyżej 1000 ha. Powierzchnia spalania płomieniowego pożaru nr 1 w dniu 3.08.2003 r. wynosiła 7376 ha, a pożaru nr 2 w dniu 2.08.2003 r. – 4732 ha. W tym samym czasie elementarny skład jąder kondensacji w obłoku burzowym zrównał się z elementarnym składem aerozoli wyemitowanych w wyniku oddziaływania pożaru w postaci obłoku dymu (Kucenogij i in. 2003, Tlisov 2002).

Na skutek pożaru nr 1 (ryc. 3, 4) uformował się obłok pożarowy o rozmiarach poziomych 82,5×40,4 km i wysokości od 3 do 5 km, a w wyniku tej znacznej wysokości, temperatura obłoku była bardzo zróżnicowana. W tym samym czasie temperatura tła obłoku wynosiła -7°C, minimalna -36°C, a maksymalna 12–17°C.

Odrębnie przeanalizowano związek przestrzenno-czasowy pożarów leśnych i naziemnych wyładowań atmosferycznych zaobserwowanych 3.08.2003 r. (ryc. 6). Zwraca uwagę fakt, że wszystkie spośród 12 wyładowań atmosferycznych odnotowanych 3.08.2003 r. zostały zlokalizowane w strefie oddziaływania pożaru nr 1, pod powierzchnią utworzonego obłoku pożarowego. Przy tym aktywność burzowa tego dnia nie zaistniała w tym rejonie z powodu frontu atmosferycznego. Porównanie czasowych i przestrzennych koordynat naziemnych wyładowań atmosferycznych i oddziałującego pożaru lasu pozwala przypuszczać, że wyładowania zostały spowodowane przez obłok pożarowy.

Według danych Lotniczej Służby Ochrony Lasów w Krasnojarsku, w okresie od 6 do 23 sierpnia na obszarze przylegającym do pożaru nr 1 odnotowano 5 mało-

powierzchniowych (do 59 ha) pożarów lasu. Wszystkie one były zgrupowane w promieniu 16 km od centrum obłoku pożarowego, przy tym jeden z nich znajdował się bezpośrednio w granicach tego obłoku. To wyraźnie ilustruje istnienie zależności zwrotnej w łańcuchu: wielki pożar – naziemne wyładowania atmosferyczne – nowe pożary lasu.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przestrzenno-czasowego połączenia danych o wielkich pożarach lasu i wyładowaniach atmosferycznych potwierdzono fakt możliwości tworzenia się obłoku pożarowego inicjującego naziemne wyładowania burzowe. A zatem wielkoopowierzchniowe pożary lasu mogą być przyczyną powstawania kolejnych pożarów w wyniku zależności zwrotnej: wielki pożar lasu – naziemne wyładowania atmosferyczne – nowe pożary leśne.

Praca została złożona 3.02.2005 r. i przyjęta przez Komitet Redakcyjny 18.05.2005 r.

Praca wykonana została przy finansowym wsparciu Krasnojarskiego Krajowego Funduszu Nauki (grant Nr 14 G 149) i Naukowo-Oświatowego Centrum "Jenisej" (REC-002).

tłum. B.U

LITERATURA

- Chromov S.P., Mamontova L.I. 1974: Meteorologičeskij slovar'. Gidrometeoizdat, Leningrad, ss. 568.
- Kirjuchin B.V., Krasikov P.N. 1963 Dožd' i sneg po vole čeloveka. Leningrad, ss. 168.
- Kravčenko I.V. 1982: Letčiku o meteorologii. Voenizdat, Moskva, ss. 255.
- Kucenogij K.P., Samsonov Ju.N., Čurkina T.V., Ivanov A.V., Ivanov V.A. 2003: Soderžanie mikroelementov v aerol'noj emissii pri požarach v boreal'nych lesach. Optika atmosfery i okeana, 16, 5-6: 461–465.
- Lapšin E.I., Gorbačev V.N., Chramov A.A. 1971: Rastitel'nost' i počvy Enisejskogo krjaža (južnaja čast'). Rastitel'nost' pravoberež'ja Eniseja. Nauka, Novosibirsk: 21–66;
- Latham D., Williams E. 2001: Lightning and forest fires [W:] Forest Fires. Behaviour and Ecological Effects (eds. E. A. Johnson, K. Miyanishi). Academic Press, San Diego: 376–418.
- Latham D.J. 1991: Lightning flashes from a prescribed fire – induced cloud. J. Geophys. Res., 96, 17151–17157.
- Lyons W.A., Nelson T.E., Williams E.R., Cramer J.A., Turner T.R. 1998: Enhanced positive cloud-to-ground lightning in thunderstorms ingesting smoke from fires. Science, 282: 77–80.

- Ponomarev E.I. 2003: *Technologia sporządzania codziennych ocen zagrożenia pożarowego z wykorzystaniem satelitarnej teledetekcji w Regionie Krasnojarskim (Wschodnia Syberia, Rosja)* [Technology of daily weather fire danger estimating by means of satellite remote sensing in Krasnoyarsk Region (Russia)]. *Pr. Inst. Bad. Leś.*, 4 (960): 5–18.
- Puzdrečenko V.D. 1978: *Dymovye šlejfy i osobennosti ich razvitija*. [W:] *Lesnye požary i bor'ba s nimi*. Leningrad: 54–61.
- Roll H.U. 1965: *Physics of the marine atmosphere*. Academic Press, N.Y. – London.
- Sukhinin A.I., Kashkin V.B., Ponomarev E.I. 1999: *Monitoring Forest Fire in Eastern Siberia from Space*. *Proceeding of SPIE*, 3983: 206–214.
- Šmeter S.M. 1972: *Fizika konvektivnych oblakov*. *Gidrometeoizdat*, Leningrad, ss. 230.
- Tlisov M.I. 2002: *Fizičeskie charakteristiki grada i mehanizm ego obrazovanija*, *Gidrometeoizdat*, Sankt Peterburg, ss. 386.
- Valendik E.N., Vekšin V. H., Verhovec S. V., Zabelin A. I., Ivanova G.A., Kisiljanov E. K. 2000. *Upravljaemyj ogon' na vyrubkach v temnochvojnyh lesach*. Novosibirsk, ss. 209.
- Vonnegut B., Orvill R. 1988: *Evidence of lightning associated with the Yellowstone Park forest fire* (abstract) *EOS Trans, AGU* 69: 1071.
- Vonnegut B., Latham D.J., Moore C.B. and Hunyady S.J. 1995: *An explanation for anomalous lightning from forest fire clouds*. *J. Geophys. Res.*, 100: 5037–5050.
- Vonskij S.M., Ždanko V.A., Korbust V.I., Semenov M.M., Tetjuševa L.V., Zavgorodnjaja L.S. 1975: *Sostavlenie i primenenie mestnyh škal požarnoj opasnosti v lesu*. *LenNILCh*, Leningrad, ss. 57.