

Požary lasów na świecie – uwarunkowania powstawania i metody badań

Forest wildfires in the world – determinants and research methods

Aleksandra Kolanek, Mariusz Szymanowski

Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego
Zakład Geoinformatyki i Kartografii
pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław
aleksandra.kolanek@uwr.edu.pl

Zarys treści: Pożary lasów są jednym z głównych zaburzeń ekosystemów, stanowiąc zarazem element naturalnych przemian siedlisk przyrodniczych. Jednak zdecydowana większość incydentów pożarowych jest skutkiem działalności człowieka. Rozwój społeczno-ekonomiczny powoduje zwiększoną antropopresję na środowiska leśne i wzrost liczby pożarów, co przekłada się na wzrost strat przyrodniczych i pozaprzyrodniczych, głównie materialnych. Do pierwszych zaliczamy m.in. niekorzystne przemiany geochemiczne gleby, zmiany mikroklimatu i stosunków wodnych oraz spadek bioróżnorodności. Rozpoznanie przyczyn powstawania pożarów oraz opracowanie skutecznych systemów ich przewidywania jest więc podyktowane nie tylko potrzebą poznania naukowego, lecz również istotnym interesem społecznym. Dlatego problematyka ta podejmowana jest na całym świecie, dając już efekty w postaci wielu systemów wczesnego wykrywania zagrożenia pożarowego w lasach. Jednocześnie wszyscy autorzy opracowań dotyczących tego zagadnienia podkreślają istotną rolę uwarunkowań lokalnych w zmiennym udziale znaczenia poszczególnych czynników, co powoduje, że bezpośrednia implementacja systemów skutecznych w danym regionie, w innych na ogół nie jest możliwa. Przegląd literatury przedmiotu wskazuje, iż w modelowaniu pożarów lasów można przyjąć podejścia stochastyczne i deterministyczne. Skala

przestrzenna badań nad przyczynami pożarów lasów różnicuje się od badań nad punktowym rozmieszczeniem tych zjawisk w skali szczegółowej aż po skalę przeglądową lub ogólną dla dużych jednostek administracyjnych i ekologicznych, a dane analizowane są zarówno dla jednego sezonu, jak i wieloleci. Głównym celem autorów niniejszego opracowania było przedstawienie czynników sprzyjających powstawaniu pożarów lasów oraz metod badania ich wpływu na ryzyko pożarowe.

Słowa kluczowe: antropopresja, czynniki przyrodnicze, metodyka badań, pożary lasów, zagrożenie pożarowe

Abstract: Forest wildfires are one of the main disturbances in ecosystems, but they are a part of natural change in natural habitats. The vast majority of fire incidents are a consequence of human activity. Socio-economic development causes increased anthropopressure on forest environments and an increase in the number of fire events, which causes an increase in natural and non-natural (mainly economic) losses. Natural losses include, among others, unfavorable geochemical soil changes, change of microclimate and water conditions, and a decline in biodiversity. Therefore, the recognition of the causes of fires and the development of effective systems of their prediction is not only a result of the need for scientific cognition, but is dictated by a significant state interest. For this reason, this problem is being tackled all over the world, resulting in many systems for early detection of forest fire hazards. At the same time, all studies on this issue underline an important role of local conditions in the variable share of the importance of individual factors, which means that direct implementation of existing systems which work in a given region is generally not possible in other regions. A review of the literature on the subject indicates that both stochastic and deterministic approaches can be adopted in modelling forest fires. The spatial scale of research differs from point-based distribution of phenomena on a small scale to broad aggregation for large administrative or ecological entities. The data is analysed both on the scale of one season and of many years. The main goal of this article is to present factors conducive to forest fires and methods of testing their impact on forest fire risk.

Keywords: anthropopressure, fire hazard, forest wildfires, natural factors, research methods

Wstęp

Pożar samoistny definiowany jest jako każdy niekontrolowany proces spalania, który wymaga rozpoczęcia działań gaśniczych (Stacey i in. 2012), natomiast o pożarach leśnych mówimy w momencie, gdy do takiego niekontrolowanego spalania dochodzi w środowisku leśnym (Perlińska, Szczygieł 2016). Pożary są uważane za jedno z głównych zaburzeń funkcjonowania ekosystemów leśnych (Oliver, Larson 1996), corocznie powodując ogromne straty ekonomiczne, przyrodnicze i społeczne. Dotyczą one 40% obszarów leśnych na świecie, 65% w Europie i aż 85% w Polsce (Perlińska, Szczygieł 2016). Są one przyczyną spadku bioróżnorodności

na obszarach nimi dotkniętymi (wyjątkiem są pirofity¹ oraz pewne gatunki sosny *Pinus sp.*), zmian mikroklimatu, niekorzystnych przemian geochemicznych gleby oraz naruszenia stosunków wodnych (Ubysz 1992; Wilkomirski, Gutry 2010). Powodują także zmiany runa, ściółki i gleby, hamując rozwój roślinności na danym obszarze, a tym samym zmianę warunków bytowych dla fauny. Pożary lasów oddziałują także negatywnie na człowieka, stanowiąc zagrożenie dla jego zdrowia a nawet życia, oraz dla jego dobytku. Spaleniu podlegają różne typy lasów rosnące we wszystkich klimatach (Innes 2000). W niektórych lasach, jak np. deszczowych strefy tropikalnej i umiarkowanej, pożary mają poważne i długoterminowe konsekwencje (Kauffman, Uhl 1990). Pożary lasów przyczyniają się także w istotny sposób do wzrostu stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze (Kasischke i in. 2000; Granier i in. 2000) oraz mogą wpływać na anomalie troposferyczne (Skinner i in. 2000). W Polsce całkowite koszty spalenia 1 hektara lasu przekraczają 100 tysięcy złotych (Karlíkowski i in. 1998), a średniorocznie na świecie przez ogień niszczone jest w różnym stopniu około 10 milionów hektarów lasów (Perlińska, Szczygieł 2016). Identyfikacja czynników wpływających istotnie na pożary powierzchni leśnych jest więc ważną kwestią, ze względów przyrodniczych, ekonomicznych oraz bezpieczeństwa.

Pożary lasów w świetle zmian klimatu i prognozy na przyszłość

Związek pożarów lasów ze zmianami klimatycznymi udowodniono w skali globalnej (Gillet i in. 2004). Aktywność pożarowa zmieniała się nieprzerwanie od ostatniego maksimum glacialnego, w odpowiedzi na długofalowe zmiany klimatu globalnego, ale także na krótkoterminowe regionalne zmiany klimatu, roślinności i użytkowania ziemi (Power i in. 2008). W Ameryce Północnej, Europie i południowej części Ameryki Południowej informacje pochodzące z datowania metodą radiowęglową wskazują na mniejszą niż obecnie aktywność pożarów w okresie deglacialnym, między 21 a 11 tysięcy lat temu. Natomiast międzyzworotnikowe

¹ Pirofity – rośliny przystosowane fizjologicznie i anatomicznie do oddziaływania ognia, dla których jest on czynnikiem stymulującym rozsiewanie nasion i kiełkowanie

szerokości geograficzne Ameryki Południowej i Afryki wykazywały ponadprzeciętną aktywność pożarową 19–17 tysięcy lat temu, a znaczne obszary Indochin i Australii wykazywały większą niż aktualnie aktywność pożarową 16–13 tysięcy lat temu. W wielu częściach Ziemi w holocenie aktywność pożarowa była większa niż obecnie lub porównywalna, z wyjątkiem wschodnich rejonów Ameryki Północnej i Azji (8–3 tysięcy lat temu), Indonezji i Australii (11–4 tysięcy lat temu) oraz południowej Ameryki Południowej (6–3 tysięcy lat temu), gdzie aktywność ta była mniejsza niż obecnie (Power i in. 2008). Badania dowiodły także, iż przyszłe zmiany klimatyczne będą istotnie wpływać na reżim pożarowy wielu części świata (Cary, Banks 2000, Dwyer i in. 2000; Fried i in. 2004), w tym i w Polsce (Szczygieł i in. 2008). Ogólna tendencja dotycząca liczby pożarów lasów i powierzchni spalonej jest bowiem wzrostowa, aczkolwiek wykazuje przestrzenne zróżnicowanie, w zależności od strefy klimatycznej i typu powierzchni leśnej (McKenzie i in. 2004; Flannigan i in. 2009). Zróżnicowanie to spowodowane jest odmiennymi warunkami klimatycznymi, co bezpośrednio przekłada się np. na inne typy lasu i odmienną roczną dystrybucję opadów. Wyniki Dwyera i in. (2000) potwierdzają, że reżim pożarowy ulega zmianie w różnych warunkach klimatycznych.

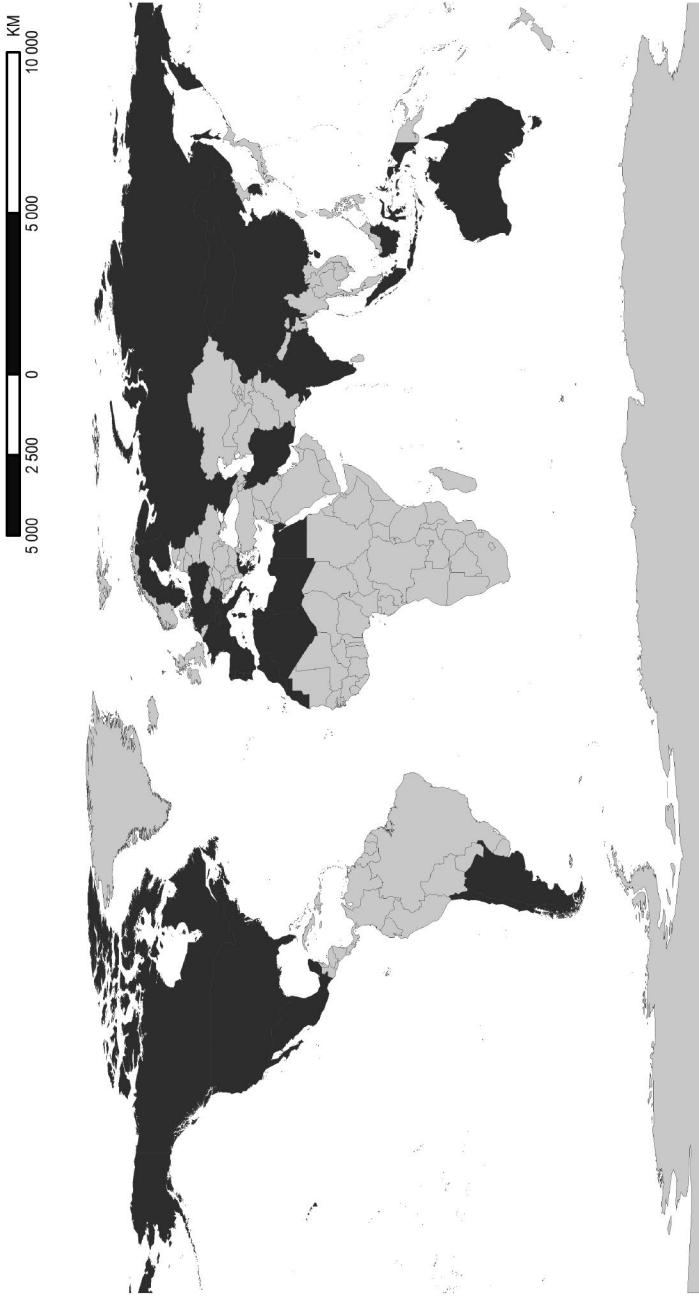
Stan badań pożarów lasów na świecie

Skala przestrzenna i czasowa

Problematyka wpływu czynników przyrodniczych oraz antropogenicznych na występowanie pożarów lasów podejmowana jest w bardzo wielu krajach na świecie (ryc. 1). Badania te prowadzone są w różnych skalach przestrzennych (od pojedynczego kompleksu leśnego czy też jednostki osadniczej, przez kompleks krajobrazowy lub region kraju, aż po wielkie regiony geograficzne i strefy klimatyczne) oraz w różnych skalach czasowych (od kilku tygodni po wielolecia).

Czynniki wpływające na występowanie pożarów lasów

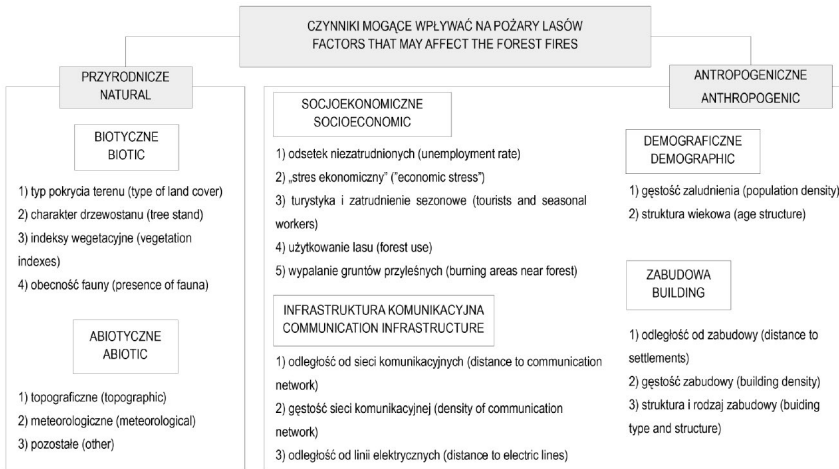
W badaniach światowych zidentyfikowano wiele czynników branych pod uwagę pod kątem ich wpływu na ryzyko wystąpienia pożaru lasu. Ogólny ich podział przedstawia rycina 2. Wśród czynników wpływających na zainicjowanie zdarzenia pożarowego można wydzielić dwie główne grupy: przyrodnicze i antropogeniczne.



Ryc. 1. Obszary prowadzenia badań nad rozpoznaniem czynników wpływających na powstawanie i rozprzestrzenianie się pożarów lasów (zaznaczone ciemną barwą).

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 1. Areas of research on the identification of factors affecting the formation and spread of forest fires (marked by dark color).
Source: author's own work.



Ryc. 2. Podział czynników mogących wpływać na występowanie pożarów w lasach

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2. Factors which may affect the occurrence of forest fires

Source: author's own work.

Na czynniki przyrodnicze składają się warunki abiotyczne i biotyczne. Nie ma wątpliwości, że najważniejszymi czynnikami abiotycznymi, wpływającymi na wystąpienie pożaru, są warunki meteorologiczne – głównie prędkość wiatru, temperatura powietrza i jego wilgotność względna, wilgotność ściółki, zachmurzenie, suma opadów oraz typ cyrkulacji atmosfery (Szczygieł 1991; Liu i in. 2012; Szczygieł 2012; Papadopoulos i in. 2013, 2014). Jak wykazali Niu i Zhai (2012), liniowy wpływ czynników meteorologicznych na wystąpienie pożaru w różnych regionach leśnych może być nieco inny co do wartości, ale zazwyczaj jest identyczny co do charakteru tego związku. Mała prędkość wiatru (do kilku m/s) zazwyczaj zwiększa ryzyko pożaru (Kobziar i in. 2006; Collins i in. 2007), lecz w momencie, gdy pożar zostanie zainicjowany, prędkość wiatru będzie decydować o sposobie rozprzestrzeniania się ognia i wielkości pożaru – im będzie ona większa, tym pożar bardziej się rozprzestrzeni (Falk i in. 2007). Rosnąca temperatura powietrza, niższa suma opadów i spadająca wilgotność względna powietrza generalnie przyczyniają się do wzrostu prawdopodobieństwa wybuchu pożaru, zwiększając palność

roślinności (Huang i in. 2000; Cardille i in. 2001; Amatulli i in. 2006; Kobziar i in. 2006; Collins i in. 2007; Falk i in. 2007; Marín i in. 2018). Papadopoulos i in. (2014) dowiedli, że nadchodzący z północy długotrwały, ciepły i suchy układ antycyklonalny, poprzedzający nadejście południowej cieplejszej cyrkulacji wyżowej, warunkuje występowanie wielkopowierzchniowych pożarów lasów w Grecji. Warunki pogodowe (czy szerzej – charakterystyka klimatyczna) wpływa na podatność na zapalenie się materiałów leśnych oraz na łatwość i intensywność rozprzestrzeniania się pożarów (Seidl i in. 2011; Szczygieł 2012). Poza tym analizowane są różnorodne indeksy klimatyczne jako kombinacja czynników meteorologicznych. Najczęściej używanym w badaniach nad pożarami lasów indeksem jest *Forest Fire Weather Index* (FWI), obliczany na podstawie wilgotności względnej powietrza (w południe, gdy ma najniższą wartość), temperatury powietrza (mierzonej w godzinach popołudniowych, gdy jest ona najwyższa), sumy opadów w ciągu doby (od południa danego dnia do południa dnia kolejnego) oraz maksymalnej średniej prędkości wiatru (Turner, Lawson 1976). Jest to indeks stosowany m. in. w Australii, Kanadzie i Grecji (odpowiednio: Dowdy i in. 2010; Turner, Lawson 1976; Dimitrakopoulos i in. 2011) i w zależności od regionu badań przyjmuje wartości całkowite od 0 do 30 (w Kanadzie), a nawet powyżej 60 (dla Grecji). Im wyższa jest wartość tego wskaźnika, tym większe oznacza to zagrożenie pożarowe. Indeks ten używany jest też często jako komponent bardziej rozbudowanych systemów prognostycznych, jak np. w Indonezji, Francji, Słowenii, Indiach czy w Chinach (Dymond i in. 2005; Leblon 2005; Šturm i in. 2012; Li i in. 2014).

Wśród czynników abiotycznych, badanych w kontekście wpływu na powstawanie pożarów, znajdują się także atrybuty topograficzne wpływające na lokalne zróżnicowanie termiczne i wilgotnościowe – wysokość nad poziomem morza, nachylenie stoków, ich zacienienie oraz ekspozycja (Xu i in. 2006; Falk i in. 2007; Vadrevu i in. 2008; Mahmud i in. 2009; Zinck i in. 2011; Serra i in. 2013). Stosowane są także różnego rodzaju indeksy topograficzne, jak np. indeks szorstkości terenu (Dickson i in. 2006). Wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza (zwłaszcza w górach) maleje zagrożenie pożarowe ze względu na spadek temperatury powietrza i wzrost sumy opadów (Collins i in. 2007; Lee i in. 2008), co zmienia też typ drzewostanu, a także zawartość wody w drzewach (Huang i in. 2000, Yin i in. 2004). Nachylenie jest uważane za ważny czynnik zwiększający zagrożenie

pożarowe – wraz z jego wzrostem erozja gleby staje się coraz intensywniejsza, a materiał palny szybciej wysycha (Yin i in. 2004; Mermoz i in. 2005; Collins i in. 2007; Lee i in. 2008; Oliveira i in. 2012). Stwierdzono także, że ryzyko wystąpienia pożaru na półkuli północnej zmniejsza się przy zmianie ekspozycji w następującej kolejności: południowa > zachodnia > wschodnia > północna, ze względu na różnicę w dostawie promieniowania słonecznego na stoki (Huang i in. 2000, Yin i in. 2004), natomiast na półkuli południowej największe zagrożenie pożarowe cechuje wystawę północną (Mermoz i in. 2005). Czynniki topograficzne silnie wpływają zarówno na prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru, jak i na wielkość powierzchni spalanej. Strone zbocza nie tylko powodują szybkie spływanie wody, lecz także zwiększają szybkość rozprzestrzeniania się ognia (Zhang i in. 2003). Jeżeli w momencie zainicjowania pożaru występuje wiatr anabatyczny, to ogień rozprzestrzenia się szybciej, niż gdyby wiatr zstępował w dół stoku (Huang i in. 2000). Czynnikiem abiotycznym badanym w kontekście pożarów lasów jest także rodzaj gleb (Cardille i in. 2001; Thonicke i Cramer 2006; Dimitrakopoulos i in. 2011; Vajda i in. 2014). Ubogie, zwłaszcza piaszczyste gleby o wysokiej przepuszczalności wpływają na zwiększenie ryzyka wystąpienia pożaru (Szczygieł 2012). Niektórzy badacze sugerują, że wyżej wymienione zmienne topograficzne są nawet ważniejszymi czynnikami wystąpienia pożaru niż zmienne klimatyczne czy pogodowe (Dillon i in. 2011).

Do grupy przyrodniczych czynników biotycznych zaliczyć można typ roślinności – w przypadku pożarów leśnych jest to rozumiane jako charakterystyka siedliskowa drzewostanu, tzn. gatunek drzew, rodzaj roślinnej pokrywy gleby, średnica pni drzew, ich wiek i wysokość (Thompson i in. 2000; Xu i in. 2006; Lee i in. 2008; Potapov i in. 2011; Szczygieł 2012; Serbin i in. 2013). Związane jest to z ogólną kondycją drzewostanu i decyduje o jego podatności na przenoszenie ognia (Cardille i in. 2001; Seidl i in. 2011). Im większa jest gęstość pokrywy roślinnej i zwartość koron drzew, tym większe jest ryzyko wystąpienia pożaru (Thompson i in. 2000). Kondycja roślinności może być również szacowana na podstawie np. znormalizowanego różnicowego indeksu wegetacyjnego (NDVI) lub wskaźników uwilgotnienia roślinności (Huang i in. 2000; Cardille i in. 2001; Maselli 2004; Leblon 2005; Thonicke i Cramer 2006; Tansey i in. 2008; Adab i in. 2013; Vajda i in. 2014; Li i in. 2014; Hawbaker i in. 2017). Poza tym niektóre typy drzewostanów

są mniej podatne na wystąpienie w nich pożaru niż inne (Cardille i in. 2001) – np. wzrost udziału drzew liściastych na ogół zmniejsza to ryzyko (Thompson i in. 2000; Thonicke i Cramer 2006; Szczygieł 2012). Kolejną podgrupą czynników jest obecność fauny – zarówno dużych zwierząt takich jak dzikie kopytne, trzoda (owce, kozy) oraz bydło, których żerowanie i wypas wpływa na zmniejszenie ryzyka wystąpienia pożaru (Kramer i in. 2003; Romero-Calcerrada i in. 2008), jak i drobnej entomofauny (np. korniki) (Ager i in. 2007; Thom i in. 2013), której wpływ polega z kolei w dużej mierze na osłabianiu kondycji drzewostanu, a więc na zwiększeniu jego podatności na ogień.

Co najmniej tyle samo uwagi co czynnikom przyrodniczym poświęcają badacze wpływowi czynników antropogenicznych na reżim pożarowy. Jest to jak najbardziej uzasadnione, biorąc pod uwagę, że działalność człowieka może być przyczyną nawet 90% pożarów na świecie (Levine 2000). Wpływ ludzkiej działalności na reżim pożarowy jest wyraźnie widoczny co najmniej od neolitu (Conedera, Tinner 2000). W analizie przyczyn pożarów lasów jej odzwierciedlenie stanowią różnorodne czynniki antropogeniczne – najczęściej są to informacje łatwe do uzyskania, takie jak gęstość zabudowy i szlaków komunikacyjnych oraz odległość od budynków i dróg. Czynniki te wpływają na wzrost ryzyka wystąpienia pożaru lasu (Chou i in. 1993; Huang i in. 2000; Cardille i in. 2001; Pew i Larsen 2001; Yin i in. 2004; Amatulli i in. 2006; Dickson i in. 2006; Xu i in. 2006; Romero-Calcerrada i in. 2008; Mahmud i in. 2009; Martínez i in. 2009; Puri i in. 2011; Oliveira i in. 2012; Adab i in. 2013). Czasami bierze się także pod uwagę rodzaj czy strukturę zabudowy (Xu i in. 2006; Romero-Calcerrada i in. 2008; Martínez i in. 2009) oraz elektroenergetyczne linie napowietrzne (Martínez i in. 2009; Oliveira i in. 2012). Pozostałe czynniki antropogeniczne odnoszone są zwykle do jednostek podziału terytorialnego, a nie do konkretnej lokalizacji (tak jak ma to miejsce w przypadku infrastruktury) – są to wskaźniki socjoekonomiczne oraz demograficzne. Wśród wskaźników demograficznych można wyróżnić: gęstość zaludnienia, strukturę wiekową (Huang i in. 2000; Cardille i in. 2001; Bonazountas i in. 2005; Amatulli i in. 2006; Xu i in. 2006; Bonazountas i in. 2007; Romero-Calcerrada i in. 2008; Oliveira i in. 2012) oraz proporcje obszarów silnie, średnio i słabo zaludnionych (Oliveira i in. 2012), przy czym im większa gęstość zaludnienia (lub liczba obszarów silnie zaludnionych), tym większe jest ryzyko wystąpienia pożaru. Do czynników

socjoekonomicznych, których wpływ na pożary lasów był badany, zalicza się np. odsetek bezrobotnych (de Almeida, e Moura 1992; Leone i in. 2009; Martínez i in. 2009; Sebastián-López i in. 2008; Velez 2002; Oliveira i in. 2012). Guldåker i Hallin (2014), badając ryzyko wybuchu pożarów w Malmö, używali pojęcia „stresu ekonomicznego”, zdefiniowanego przez wiele czynników, takich jak odsetek niezatrudnionych, odsetek osób słabo wykształconych, segregacja rasowa, przeludnienie (jako liczba m² na osobę w mieszkaniu) i sytuacja rodzinna (wysoki udział osób niepełnoletnich). W badaniach tych wykazano, że występowanie takich stresorów przy znacznym odsetku młodych mężczyzn zwiększa ryzyko częstszych i celowych pożarów na danym obszarze (jako wyraz frustracji tych ludzi sytuacją, w jakiej się znajdują). Potencjalnie wysokie bezrobocie czy trudna sytuacja materialna i społeczna mogłyby wpływać na wzrost ryzyka pożaru lasu nie tylko na terenie miasta czy wsi, lecz też w ich bezpośrednim pobliżu. Innymi czynnikami mogącymi wpływać na wystąpienie pożarów są także presja turystyczna i zatrudnienie sezonowe (Cardille i in. 2001; Bonazountas i in. 2007; Romero-Calcerrada i in. 2008; Martínez i in. 2009), ponadto zwierzęta domowe (Bonazountas i in. 2007), wypalanie traw, ściernisk czy pozostałości po zbiorach plonów na gruntach przylegających do lasów oraz zła polityka zarządzania powierzchniami leśnymi (Kozuchowski 1997; Martínez i in. 2009).

Osobnymi kategoriami informacji zewnętrznej analizowanej pod kątem ryzyka pożarowego są: rodzaj pokrycia terenu (Lloret i in. 2002; Mermoz i in. 2005; Amatulli i in. 2006; Amatulli i in. 2007; Puri i in. 2011; Oliveira i in. 2012; Lanorte i in. 2013; Li i in. 2014; Hawbaker i in. 2017) oraz struktura krajobrazu (Bajocco, Ricotta 2008), które mogą być ujmowane w grupie czynników przyrodniczych (w tym biotycznych) i antropogenicznych.

Źródła danych

Rodzaj analizowanych zmiennych środowiskowych zależy w dużej mierze od dostępności danych źródłowych. Typ pokrycia terenu i informacja siedliskowa najczęściej pochodzą z krajowych baz danych o pokryciu terenu (Cardille i in. 2001; Puri i in. 2011; Shvidenko i in. 2011) lub baz gromadzących charakterystykę przyrodniczo-leśną (Bank Danych o Lasach 2019). Poza tym informację taką można pozyskiwać bezpośrednio z danych satelitarnych, jak MODIS i Landsat (Arroyo i in.

2008), w celu opracowania wskaźników (takich jak NDVI), na podstawie których można wnioskować o kondycji drzewostanu. Zmienne topograficzne (pierwotne i wtórne atrybuty topograficzne) pozyskiwane są na podstawie numerycznych modeli terenu. Informacje o warunkach pogodowych można uzyskać w oparciu o sieć stacji meteorologicznych, modeli klimatycznych lub z reanaliz meteorologicznych (ECMWF 2019). Dane dotyczące aktywności społeczno-gospodarczej człowieka pozyskuje się najczęściej w oparciu o bazy danych ludnościowych oraz jako informacje z urzędów statystycznych, zebrane np. podczas spisów powszechnych. Dane o innych czynnikach antropogenicznych, takie jak informacje o sieci drogowej i zabudowie, można otrzymać z baz danych obiektów topograficznych, geodezyjnych itp., prowadzonych przez krajowe służby geodezyjne.

Metody badań

W badaniach światowych informację dotyczącą pożarów rozpatruje się według trzech głównych podejść przestrzennych. Pierwsze (i jednocześnie najczęstsze) z nich analizuje pożary jako punktowe zdarzenia (dane dyskretne) – np. Cardille i in. 2001; Mermoz i in. 2005; Brooks, Matchett 2006; Dickson i in. 2006; Xu i in. 2006; Bonazountas i in. 2007; Falk i in. 2007; Bajocco i Ricotta 2008; LaCroix i in. 2008; Romero-Calcerrada i in. 2008; Hering i in. 2009; Turner 2009; Bastarrika i in. 2011; Lanorte i in. 2013; Li i in. 2014; Hawbaker i in. 2017. W drugim podejściu informacja ta odnosi się do pól podstawowych, którymi mogą być np. jednostki administracyjne (np. de la Riva i in. 2004; Martínez i in. 2009; Pausas i Paula 2012), sieć kwadratów (m.in. Chou i in. 1993; Cardille i in. 2001; Pew, Larsen 2001; Amatulli i in. 2007) albo jednostki przyrodnicze, jak np. kompleksy leśne (m.in. Chou i in. 1993; Lloret i in. 2002; Wotton i in. 2003). Trzecie podejście wykorzystuje funkcje gęstości na bazie punktowej reprezentacji pożarów (Podur i in. 2003; Amatulli i in. 2006; Møller, Díaz-Avalos 2010; Oliveira i in. 2012; Guldåker, Hallin 2014), analizując tym samym informację ciągłą przestrzennie.

Badania charakteru przestrzennego zjawiska dokonuje się zwykle za pomocą funkcji sąsiedztwa (analiza najbliższego sąsiada, funkcje wyższego rzędu np. k-funkcja Ripley'a) (Podur i in. 2003; Vega-García, Chuvieco 2006; Amatulli i in. 2007; LaCroix i in. 2008; Vadrevu i in. 2008; Kim i in. 2009; Guldåker, Hallin 2014) albo na drodze badania autokorelacji przestrzennej (analiza klastrów,

identyfikowanie hot spotów, szukanie obszarów o podobnych charakterystykach) – Chou i in. 1993; Dymond i in. 2005; Mermoz i in. 2005; Pausas, Paula 2012; Lanorte i in. 2013; Oom, Pereira 2013; Marín i in. 2018.

Do badania wpływu czynników zewnętrznych na wystąpienie pożaru można użyć podejścia stochastycznego lub deterministycznego. W zależności od rodzaju przestrzennej reprezentacji informacji pożarowej oraz celu badań (jedynie identyfikacja czynników czy opracowanie map zagrożenia lub systemów predykcji pożarów) stosowane są różnorodne metody analizowania wpływu czynników środowiskowych i antropogenicznych. Najczęściej stosowaną metodą jest regresja logistyczna (Menard 1995), która nie tylko pozwala ocenić wpływ każdego z czynników osobno, lecz w dodatku na jej podstawie można zbudować model oceniający prawdopodobieństwo (określane jako szansa) wystąpienia pożaru w danej jednostce powierzchni lub miejscu (w zależności od przyjętego podejścia przestrzennego) – np. Chou i in. 1993; Cardille i in. 2001; Pew, Larsen 2001; Mermoz i in. 2005; Kobziar i in. 2006; Vega-García, Chuvieco 2006; Martínez i in. 2009; Weibel 2009; Bastarrika i in. 2011; Dimitrakopoulos i in. 2011; Šturm i in. 2012; Li i in. 2014; Seidl i in. 2011. Poza regresją logistyczną stosuje się głównie inne metody regresyjne z grupy uogólnionych modeli liniowych (GML) – (Seidl i in. 2011; Cardille i in. 2001; Wotton i in. 2003; Syphard i in. 2008), analizę CART (classification and regression tree analysis) – (np. Amatulli i in. 2006; Potapov i in. 2011), analizę trendu – trend analysis – (m.in. Maselli 2004; Niu, Zhai 2012), sieci neuronowe (Vega-García, Chuvieco 2006), drzewa decyzyjne (Amatullii i in. 2006), metody krigingowe lub modelowanie semiwariogramu (Hyppänen 1996; Atkinson, Lewis 2000; López-Granados i in. 2005; Brooks, Matchett 2006), a także regresję ważoną geograficznie (GWR) – Guldåker, Hallin 2014. Ponadto przy trudnej do analizy dużej liczbie skorelowanych zmiennych wykorzystuje się także metodę składowych głównych (PCA) – Keane i in. 2004; Mermoz i in. 2005; Xu i in. 2006. Innymi miarami analizy statystycznej wykorzystywanymi w badaniach nad pożarami lasów są np. ANOVA, współczynniki korelacji Spearmana lub Pearsona (m. in. Pew, Larsen 2001; Mermoz i in. 2005; Kobziar i in. 2006; Amatulli i in. 2007), a za najlepszą miarę dopasowania modelu przyjmuje się zwykle kryterium Akaike (np. Brooks, Matchett 2006; Pausas, Paula 2012). Implementacja wyników badań przybiera różne formy: od najprostszych działań arytmetycznych na warstwach

rastrowych na podstawie wyestymowanych równań regresji (np. Xu i in. 2006; Amatulli i in. 2007; Chowdhury i Hassan 2013), aż po tworzenie rozbudowanych systemów predykcyjnych (np. Van Wagner, Forest 1987; Thompson i in. 2000; Lee i in. 2008; Tian i in. 2005; Thonicke, Cramer 2006; Chowdhury, Hassan 2013).

Większość autorów przywołanych powyżej opracowań podkreśla istotną rolę uwarunkowań lokalnych w zmiennym udziale znaczenia poszczególnych czynników. Dlatego też model działający z powodzeniem w jednym rejonie świata (np. Australia, Chiny, USA) jest trudny do bezpośredniej implementacji na innym obszarze.

Stan badań pożarów lasów w Polsce

W Polsce zagadnieniem pożarów lasów zajmuje się Laboratorium Ochrony Przeciwożarowej Lasu Instytutu Badawczego Leśnictwa. Czynniki rozpatrywanymi w kontekście zdarzeń pożarowych w polskich lasach są warunki meteorologiczne (wilgotność względna powietrza, wilgotność ściółki sosnowej, temperatura powietrza, opad atmosferyczny, prędkość wiatru, zachmurzenie), których charakterystyki wchodzą do systemu oceny stopnia zagrożenia pożarowego lasu dla sytuacji bieżącej i/lub z wyprzedzeniem do 24 godzin. Na podstawie zmierzonych oraz prognozowanych parametrów meteorologicznych obliczany jest stopień zagrożenia pożarowego lasów (SZPL) – bieżący i prognozowany. Ponadto dla każdego nadleśnictwa określa się w planie urządzenia lasu kategorię zagrożenia pożarowego lasu (KZPL), która obejmuje lasy o podobnym poziomie podatności na pożar. Opracowywana jest ona w oparciu o cztery parametry: a) średnią roczną liczbę pożarów na jednostkę powierzchni w ostatnich 10 latach, b) udział powierzchni drzewostanów rosnących na siedliskach szczególnie podatnych na powstanie pożaru, c) ogólne warunki wilgotnościowe powietrza i ściółki, d) liczbę mieszkańców przypadającą na 1 hektar powierzchni leśnej (Rozporządzenie 2006; Piwnicki i in. 2008a, 2008b; Szczygieł i in. 2008; Kwiatkowski i in. 2010; Ubysz i in. 2010).

Prace te rozwijane są jednak w celu lepszej detekcji i ochrony przeciwpożarowej aniżeli w kierunku pogłębiania wiedzy o czynnikach wpływających na wystąpienie pożarów w lasach. Wartość SZPL obliczana jest dla 60 wielkoobszarowych

stref prognostycznych na podstawie danych ze 137 stacji pomiarowych. Granice tych stref – mimo że uwzględniają warunki przyrodnicze, klimatyczne i niektóre czynniki antropogeniczne – poprowadzono w głównej mierze według administracyjnych granic nadleśnictw (Rozporządzenie 2006), które nie uwzględniają wewnętrznego zróżnicowania siedliskowego, ani istnienia lokalnych różnic warunków przyrodniczych w tych strefach. Na poziomie szczegółowym (wydziałów, oddziałów i leśnictw) istnieje metoda ustalania klas palności drzewostanów, ale jest ona wykorzystywana jedynie na potrzeby opracowywania wytycznych ochrony przeciwpożarowej lasu i działań gaśniczych. Dodatkowo prognozy SZPL tworzone są dla tzw. sezonu palności – od momentu ustąpienia pokrywy śnieżnej (zwykle od 1.04) do 30.09, podczas gdy liczba pożarów wybuchających poza tym okresem stanowić może nawet 30% całkowitej ich liczby w danym roku (opracowanie własne na podstawie danych z Krajowego Systemu Informacji o Pożarach Lasów). Uwzględnienie większej liczby zmiennych przyrodniczych, prowadzenie analizy na poziomie mniejszych obszarowo jednostek przestrzennych, położenie większego nacisku na identyfikację czynników antropogenicznych oraz zastosowanie regresji logistycznej być może umożliwiłoby lepsze rozpoznanie i skwantyfikowanie wpływu poszczególnych czynników zewnętrznych na powstawanie pożarów, co stanowi zagadnienie istotne z naukowego i praktycznego punktu widzenia, zwłaszcza w kontekście przewidywanego wzrostu występowania pożarów lasów w Polsce (Szczygieł i in. 2008).

Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule czynniki wpływające na występowanie pożarów lasów można podzielić na dwie główne grupy – przyrodnicze i antropogeniczne, a metodami pozwalającymi zidentyfikować wpływ poszczególnych z nich są głównie metody regresyjne, wśród których prym wiodzie regresja logistyczna. Udziały i proporcje poszczególnych czynników wykazują zmienność w zależności od regionu świata i skali przestrzennej. Ponadto wybór czynników do analiz w dużej mierze zależy od dostępności danych. Najczęściej jednak (poza pirofitami, np. na zachodzie Ameryki Północnej) zaistnienie pożaru jest w głównej mierze zależne od człowieka, przy czym warunkiem koniecznym jest osiągnięcie pewnej wartości

krytycznej, związanej z cechami materiału palnego. Decydują o tym głównie: wilgotność ściółki, kondycja drzew i warunki meteorologiczne. Gdy pożar już zaistnieje, jego dalsze rozprzestrzenianie jest funkcją warunków pogodowych, uwarunkowań topograficznych oraz struktury i ilości materiału palnego. Rozumowanie to popierają Seidl i in. (2011). Nawet w regionach, w których pożary wybuchają głównie z powodu działalności człowieka, warunki naturalne wpływają na cechy materiału palnego (np. na jego wilgotność) oraz na sposób rozprzestrzeniania się pożarów (Dimitrakopoulos i in. 2010). Biorąc pod uwagę wyniki badań wskazujących na globalną wzrostową tendencję liczby pożarów lasów (Balling i in. 1992; Cary i Banks 2000, Dwyer i in. 2000; Fried i in. 2004; Shvidenko i in. 2011), zagadnienie to powinno być obiektem szczególnego zainteresowania naukowców i publicznych służb w krajach całego świata, zwłaszcza że ekonomiczne i pozaekonomiczne straty wywoływane pożarami są bardzo dotkliwe.

Literatura

- Adab H., Kanniah K. D., Solaimani K., 2013, *Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques*, Natural Hazards, 65(3), 1723–1743.
- de Almeida A. F., e Moura P. V., 1992, *The relationship of forest fires to agro-forestry and socio-economic parameters in Portugal*, International Journal of Wildland Fire, 2(1), 37–40.
- Ager A.A., McMahan A., Hayes J.L., Smith E.L., 2007, *Modeling the effects of thinning on bark beetle impacts and wildfire potential in the Blue Mountains of eastern Oregon*, Landscape and Urban Planning, 80(3), 301–311.
- Amatulli G., Pérez-Cabello F., de la Riva J., 2007, *Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty*, Ecological modelling, 200(3–4), 321–333.
- Amatulli G., Rodrigues M.J., Trombetti M., Lovreglio R., 2006, *Assessing long-term fire risk at local scale by means of decision tree technique*, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 111(G4), 1–15.
- Arroyo L.A., Pascual C., Manzanera J. A., 2008, *Fire models and methods to map fuel types: the role of remote sensing*, Forest ecology and management, 256(6), 1239–1252.
- Atkinson P. M., Lewis P., 2000, *Geostatistical classification for remote sensing: an introduction*, Computers & Geosciences 26, 362–371.

- Bajocco S., Ricotta C., 2008, *Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): which land-cover classes do wildfires prefer?*, *Landscape Ecology*, 23(2), 241–248.
- Balling R.C., Meyer G.A., Wells S. G., 1992, *Climate change in Yellowstone National Park: is the drought-related risk of wildfires increasing?*, *Climatic change*, 22(1), 35–45.
- Bank Danych o Lasach, <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/mapy> (dostęp: 02.01.2019).
- Bastarrika A., Chuvieco E., Martín M. P., 2011, *Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors*, *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1003–1012.
- Bonazountas M., Kallidromitou D., Kassomenos P.A., Passas N., 2005, *Forest fire risk analysis, Human and Ecological Risk Assessment*, 11(3), 617–626.
- Bonazountas M., Kallidromitou D., Kassomenos P.A., Passas N., 2007, *A decision support system for managing forest fire casualties*, *Journal of Environmental Management*, 84(4), 412–418.
- Brooks M.L., Matchett, J.R., 2006, *Spatial and temporal patterns of wildfires in the Mojave Desert, 1980–2004*, *Journal of Arid Environments*, 67, 148–164.
- Cardille J.A., Ventura S.J., Turner M.G., 2001, *Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, United States*, *Ecological applications*, 11(1), 111–127.
- Cary G.J., Banks J.C. G., 2000, *Fire regime sensitivity to global climate change: An Australian perspective* [in:] Innes J. L., Beniston M., Verstraete M. M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 233–246.
- Chou Y.H., Minnich R.A., Chase R.A., 1993, *Mapping probability of fire occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA*, *Environmental Management*, 17(1), 129–140.
- Chowdhury E.H., Hassan Q.K., 2013, *Use of remote sensing-derived variables in developing a forest fire danger forecasting system*, *Natural Hazards*, 67(2), 321–334.
- Collins B.M., Kelly M., van Wagtenonk J. W., Stephens S.L., 2007, *Spatial patterns of large natural fires in Sierra Nevada wilderness areas*, *Landscape Ecology*, 22(4), 545–557.
- Conedera M., Tinner W., 2000, *The interaction between forest fires and human activity in southern Switzerland* [in:] Innes J. L., Beniston M., Verstraete M.M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 233–246
- De la Riva J., Pérez-Cabello F., Lana-Renault N., Koutsias N., 2004, *Mapping wildfire occurrence at regional scale*, *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 363–369.

- Dickson B.G., Prather J. W., Xu Y., Hampton H. M., Aumack E.N., Sisk T. D., 2006, *Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona, USA*, Landscape Ecology, 21(5), 747–761.
- Dillon G.K., Holden Z. A., Morgan P., Crimmins M.A., Heyerdahl E.K., Luce C. H., 2011, *Both topography and climate affected forest and woodland burn severity in two regions of the western US, 1984 to 2006*, Ecosphere, 2(12), 1–33.
- Dimitrakopoulos A.P., Bemmerzouk A.M., Mitsopoulos I.D., 2011, *Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment*, Meteorological Applications, 18(1), 83–93.
- Dimitrakopoulos A.P., Mitsopoulos I.D., Gatoulas K., 2010, *Assessing ignition probability and moisture of extinction in a Mediterranean grass fuel type*, International Journal of Wildland Fire, 19, 29–34.
- Dowdy A.J., Mills G.A., Finkele K., de Groot W., 2010, *Index sensitivity analysis applied to the Canadian forest fire weather index and the McArthur forest fire danger index*, Meteorological Applications, 17(3), 298–312.
- Dwyer E., Gregoire J.-M., Pereira J.M. C., 2000, *Climate and vegetation as driving factors in global fire activity* [in:] Innes J.L., Beniston M., Verstraete M. M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 171–192.
- Dymond C.C., Field R.D., Roswintarti O., 2005, *Using satellite fire detection to calibrate components of the fire weather index system in Malaysia and Indonesia*, Environmental management, 35(4), 426–440.
- ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://www.ecmwf.int/> (dostęp: 03.01.2019).
- Falk D.A., Miller C., McKenzie D., Black A.E., 2007, *Cross-scale analysis of fire regimes*, Ecosystems, 10(5), 809–823.
- Flannigan M.D., Krawchuk M.A., de Groot W.J., Wotton B.M., Gowman L.M., 2009, *Implications of changing climate for global wildland fire*, International journal of wildland fire, 18(5), 483–507.
- Fried J.S., Torn M.S., Mills E., 2004, *The impact of climate change on wildfire severity: a regional forecast for northern California*, Climatic change, 64(1–2), 169–191.
- Gillett N.P., Weaver A.J., Zwiers F.W., Flannigan M.D., 2004, *Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires*, Geophysical Research Letters, 31(18), 1–4.

- Granier C., Müller J.F., Brasseur G., 2000, *The impact of biomass burning on the global budget of ozone and ozone precursors* [in:] Innes J. L., Beniston M., Verstraete M. M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 69–86.
- Guldåker N., Hallin, P. O., 2014, *Spatio-temporal patterns of intentional fires, social stress and socio-economic determinants: A case study of Malmö, Sweden*, *Fire Safety Journal*, 70, 71–80.
- Hawbaker T.J., Vanderhoof M.K., Beal Y.J., Takacs J.D., Schmidt G.L., Falgout J.T., Williams B., Fairaux N.M., Caldwell M.K., Picotte J.J., Howard S.M., Stitt S., Dwyer J. L., 2017, *Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data*, *Remote Sensing of Environment*, 198, 504–522.
- Hering A.S., Bell C. L., Genton M.G., 2009, *Modeling spatio-temporal wildfire ignition point patterns*, *Environmental and Ecological Statistics*, 16(2), 225–250.
- Huang F., Liu X. N., Yuan J.G., 2000, *Study on forest fire danger model with remote sensing based on GIS*, *Chinese Geographical Science*, 10(1), 61–67.
- Hyppänen H., 1996, *Spatial autocorrelation and optimal spatial resolution of optical remote sensing data in boreal forest environment*, *International Journal of Remote Sensing*, 17(17), 3441–3452.
- Innes J. L., 2000, *Biomass burning and climate: an introduction* [in:] Innes J. L., Beniston M., Verstraete M. M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1–14.
- Kauffman J.B., Uhl C., 1990, *Interactions of anthropogenic activities, fire, and rain forests in the Amazon Basin* [in:] Goldammer J. (ed.), *Fire in the tropical biota*, Springer, Berlin–Heidelberg, 117–134.
- Karlikowski T., Parzuchowska J., Sakowska H., Zając S., 1998, *Ocena ekonomiczna strat spowodowanych przez pożary lasu w Polsce w latach 1991–1995*, *Postępy Techniki w Leśnictwie*, 68, 52–58.
- Kasischke E.S., Stocks B.J., O'Neill K., French N.H.F., Bourgeau-Chavez L. L., 2000, *Direct effects of fire on the boreal forest carbon budget* [in:] Innes J. L., Beniston M., Verstraete M.M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 60–68.
- Keane R.E., Cary G.J., Davies I.D., Flannigan M.D., Gardner R.H., Lavorel S., Leniham J. M., Li C., Rupp, T.S., 2004, *A classification of landscape fire succession models: spatial simulations of fire and vegetation dynamics*, *Ecological Modelling*, 179(1), 3–27.

- Kim Y. H., Bettinger P., Finney M., 2009, *Spatial optimization of the pattern of fuel management activities and subsequent effects on simulated wildfires*, *European Journal of Operational Research*, 197(1), 253–265.
- Kobziar L., Moghaddas J., Stephens S. L., 2006, *Tree mortality patterns following prescribed fires in a mixed conifer forest*, *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 3222–3238.
- Kożuchowski L., 1997, *Wypalanie roślinności katastrofą środowiska przyrodniczego*, PKE OP-K, Toruń.
- Kramer K., Groen T. A., van Wieren S. V., 2003, *The interacting effects of ungulates and fire on forest dynamics: an analysis using the model FORSPACE*, *Forest ecology and management*, 181(1–2), 205–222.
- Kwiatkowski M., Szczygieł R., Piwnicki J., 2010, *Opracowanie nowej metody prognozowania zagrożenia pożarowego lasu*, Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary.
- LaCroix J. J., Li Q., Chen J., Henderson R., John, R., 2008, *Edge effects on fire spread in a disturbed Northern Wisconsin landscape*, *Landscape Ecology*, 23(9), 1081–1092.
- Lanorte A., Danese M., Lasaponara R., Murgante, B., 2013, *Multiscale mapping of burn area and severity using multisensor satellite data and spatial autocorrelation analysis*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 20, 42–51.
- Leblon B., 2005, *Monitoring forest fire danger with remote sensing*, *Natural Hazards*, 35(3), 343–359.
- Lee B., Kim S. Y., Chung J., Park P. S., 2008, *Estimation of fire severity by use of Landsat TM images and its relevance to vegetation and topography in the 2000 Samcheok forest fire*, *Journal of Forest Research*, 13(4), 197–204.
- Leone V., Lovreglio R., Martín M.P., Martínez J., Vilar L., 2009, *Human factors of fire occurrence in the Mediterranean* [in:] Chuvieco E (ed.), *Earth observation of wildland fires in Mediterranean ecosystems*, Springer, Berlin–Heidelberg, 149–170.
- Levine J. S., 2000, *Global Biomass Burning: A Case Study of the Gaseous and Particulate Emissions Released to the Atmosphere During the 1997 Fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia* [in:] Innes J. L., Beniston M., Verstraete M. M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 15–32.
- Li X., Zhao G., Yu X., Yu Q., 2014, *A comparison of forest fire indices for predicting fire risk in contrasting climates in China*, *Natural Hazards*, 70(2), 1339–1356.
- Liu X., Zhang J., Bao Y., 2012, *The Forest Resource Geo-science Analysis and Application in Forest Fire Risk Based on RS and GIS* [in:] Yang H., Su W., Quian Z., Cao L., Wang T. (ed.),

- Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*, Springer, Berlin–Heidelberg, 793–799.
- Lloret F., Calvo E., Pons X., Díaz-Delgado, R., 2002, *Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula*, *Landscape Ecology*, 17(8), 745–759.
- López-Granados F., Jurado-Expósito M., Perna-Barragán J. M., García-Torres L., 2005, *Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties*, *European Journal of Agronomy* 23, 279–289.
- Mahmud A., Setiawan I., Mansor S., Shariff A., Pradhan B., Nuruddin, A., 2009, *Utilization of geoinformation tools for the development of forest fire hazard mapping system: example of Pekan fire, Malaysia*, *Open Geosciences*, 1(4), 456–462.
- Marín P. G., Julio C. J., Arturo R. T. D., Jose V. N. D., 2018, *Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico*, *Chinese Geographical Science*, 28(1), 25–37.
- Martínez J., Vega-García C., Chuvieco E., 2009, *Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain*, *Journal of environmental management*, 90(2), 1241–1252.
- Maselli F., 2004, *Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data*, *Remote sensing of environment*, 89(4), 423–433.
- McKenzie D., Gedalof Z. E., Peterson D. L., Mote P., 2004, *Climatic change, wildfire, and conservation*, *Conservation Biology*, 18(4), 890–902.
- Menard S.W., 1995, *Applied logistic regression analysis*, SAGE Publication, London.
- Mermoz M., Kitzberger T., Veblen T. T., 2005, *Landscape influences on occurrence and spread of wildfires in Patagonian forests and shrublands*, *Ecology*, 86(10), 2705–2715.
- Møller J., Díaz-Avalos C., 2010, *Structured spatio-temporal shot-noise Cox point process models, with a view to modelling forest fires*, *Scandinavian Journal of Statistics*, 37(1), 2–25.
- Niu R., Zhai P., 2012, *Study on forest fire danger over Northern China during the recent 50 years*, *Climatic change*, 111(3–4), 723–736.
- Oliveira S., Oehler F., San-Miguel-Ayán J., Camia A., Pereira J.M., 2012, *Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest*, *Forest Ecology and Management*, 275, 117–129.
- Oliver C. D., Larson B. C., 1996, *Forest stand dynamics. Update edition*, John Wiley & Sons. New York.
- Oom D., Pereira J. M., 2013, *Exploratory spatial data analysis of global MODIS active fire data*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 326–340.
- Papadopoulos A., Paschalidou A. K., Kassomenos P. A., McGregor G., 2013, *Investigating the*

- relationship of meteorological/climatological conditions and wildfires in Greece*, Theoretical and applied climatology, 112(1–2), 113–126.
- Papadopoulos A., Paschalidou A., Kassomenos P. A., McGregor G., 2014, *On the association between synoptic circulation and wildfires in the Eastern Mediterranean*, Theoretical and applied climatology, 115(3–4), 483–501.
- Pausas J.G., Paula S., 2012, *Fuel shapes the fire–climate relationship: evidence from Mediterranean ecosystems*, Global Ecology and Biogeography, 21(11), 1074–1082.
- Piwnicki J., Ubysz B., Szczygieł R., 2008a, *Forest fire danger forecasting in Poland*, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 119, 81–87.
- Piwnicki J., Ubysz B., Szczygieł R., 2008b, *Measuring the Effectiveness of Poland's fire monitoring system*, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 119, 153–159.
- Perlińska A., Szczygieł R., 2016, *Ryzyko i konsekwencje występowania pożarów w lasach [w:] Zimowa Szkoła Leśna przy Instytucie Badawczym Leśnictwa. VIII Sesja. Zagrożenia lasu oraz jego funkcji – przyczyny, konsekwencje i szanse dla gospodarki leśnej*, 15–17 marca 2016, Sękocin Stary.
- Pew K.L., Larsen C.P. S., 2001, *GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada*, Forest ecology and management, 140(1), 1–18.
- Podur J., Martell D.L., Csillag F., 2003, *Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976–1998*, Ecological Modelling, 164(1), 1–20.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C., 2011, *Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia*, Remote Sensing of Environment, 115(2), 548–561.
- Power M.J., Marlon J., Ortiz N., Bartlein P.J., Harrison S.P., Mayle F.E., Ballouche A., Bradshaw R.H. W., Carcaillet C., Cordova C., Mooney S., Moreno P. I., Prentice I.C., Thonicke K., Tinner W., Whitlock C., Zhang Y., Zhao Y., Ali A. A., Anderson R. S., Beer R., Behling H., Briles C., Brown K. J., Brunelle A., Bush M., Camill P., Chu G. Q., Clark J., Colombaroli D., Connor S., Daniau A.-L., Daniels M., Dodson J., Doughty E., Edwards M.E., Finsinger W., Foster D., Frechette J., Gaillard M. J., Gavin D. G., Gobet E., Haberle S., Hallett D.J., Higuera P., Hope G., Horn S., Inoue J., Kaltenrieder P., Kennedy L., Kong Z.C., Larsen C., Long C. J., Lynch J., Lynch E. A., McGlone M., Meeks S., Mensing S., Meyer G., Minckley T., Mohr J., Nelson D.M., New J., Newnham R., Noti R., Oswald W., Pierce J., Richard P.J.H., Rowe C., Sanchez Goñi M.F., Shuman B.N., Takahara H.,

- Toney J., Turney C., Urrego-Sanchez D.H., Umbanhowar C., Vandergoes M., Vanniere B., Vescovi E., Walsh M., Wang X., Williams N., Wilmschurst J., Zhang J.H., 2008, *Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data*, *Climate dynamics*, 30(7–8), 887–907.
- Puri K., Areendran G., Raj K., Mazumdar S., Joshi P.K., 2011, *Forest fire risk assessment in parts of Northeast India using geospatial tools*, *Journal of forestry research*, 22(4), 641.
- Romero-Calcerrada R., Novillo C., Millington J.D.A., Gomez-Jimenez I., 2008, *GIS analysis of spatial patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (Central Spain)*, *Landscape Ecology*, 23(3), 341–354.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 marca 2006 r. w sprawie szczegółowych zasad zabezpieczenia przeciwpożarowego lasów (Dz. U. z 2006 r. Nr 58, poz. 405 z późn. zm.).
- Sebastián-López A., Salvador-Civil R., Gonzalo-Jiménez J., SanMiguel-Ayaz J., 2008, *Integration of socio-economic and environmental variables for modelling long-term fire danger in Southern Europe*, *European Journal of Forest Research*, 127(2), 149–163.
- Seidl R., Fernandes P.M., Fonseca T.F., Gillet F., Jönsson A. M., Merganicová K., Netherer S., Arpaci A., Bontemps J.-D., Bugmann H., González-Olabarria J. R., Lasch P., Meredieu C., Moreira F., Schelhaas M.-J., Mohren F., 2011, *Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review*, *Ecological Modelling*, 222(4), 903–924.
- Serbin S.P., Ahl D.E., Gower S.T., 2013, *Spatial and temporal validation of the MODIS LAI and FPAR products across a boreal forest wildfire chronosequence*, *Remote Sensing of Environment*, 133, 71–84.
- Serra L., Juan P., Varga D., Mateu J., Saez M., 2013, *Spatial pattern modelling of wildfires in Catalonia, Spain 2004–2008*, *Environmental modelling & software*, 40, 235–244.
- Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D.G., Vaganov E.A., Sukhinin A. I., Maksyutov S.S., McCallum I., Lakyda I. P., 2011, *Impact of wildfire in Russia between 1998–2010 on ecosystems and the global carbon budget*, *Doklady Earth Sciences*, 441(2), 1678–1682.
- Skinner W.R., Stocks B.J., Martell D.L., Bonsai B., Shabbar A., 2000, *The Relationship Between Area Burned by Wildland Fire in Canada and Circulation Anomalies in the Mid-Troposphere*, [in:] Innes J.L., Beniston M., Verstraete M.M. (ed.), *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 101–126.
- Stacey R., Gibson S., Hedley P., 2012, *European Glossary for wildfires and forest fires*. EUFOFINET Project.

- Syphard A.D., Radeloff V.C., Keuler N. S., Taylor R.S., Hawbaker T.J., Stewart S.I., Clayton M. K., 2008, *Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape*, International Journal of Wildland Fire, 17(5), 602–613.
- Szczygieł R., 1991, *Warunki meteorologiczne a pożary lasu*, Zeszyty Naukowe SGSP, 1(8) .
- Szczygieł R., 2012, *Wielkoobszarowe pożary lasów w Polsce*, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 1, 67–78.
- Szczygieł R., Ubysz B., Piwnicki J., 2008, *Wpływ zmian klimatycznych na kształtowanie się zagrożenia pożarowego lasów w Polsce*, Leśne Prace Badawcze, 69(1), 67–72.
- Šturm T., Fernandes P.M., Šumrada R., 2012, *The Canadian fire weather index system and wildfire activity in the Karst forest management area, Slovenia*, European Journal of Forest Research, 131(3), 829–834.
- Tansey K., Beston J., Hoscilo A., Page S.E., Paredes Hernández C. U., 2008, *Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D23), 1–8.
- Thom D., Seidl R., Steyrer G., Krehan H., Formayer H., 2013, *Slow and fast drivers of the natural disturbance regime in Central European forest ecosystems*, Forest Ecology and Management, 307, 293–302.
- Thompson W.A., Vertinsky I., Schreier H., Blackwell B.A., 2000, *Using forest fire hazard modelling in multiple use forest management planning*, Forest Ecology and Management, 134(1–3), 163–176.
- Thonicke K., Cramer W., 2006, *Long-term trends in vegetation dynamics and forest fires in Brandenburg (Germany) under a changing climate*, Natural Hazards, 38(1–2), 283–300.
- Tian X. R., Mcrae D.J., Boychuk D., Jin J.Z., Shu L.F., Wang M.dY., 2005, *Comparisons and assessment of forest fire danger systems*, Forestry Studies in China, 7(1), 53–61.
- Turner J. A., Lawson B.D., 1978, *Weather in the Canadian forest fire danger rating system. A user guide to national standards and practices*, technical elaboration.
- Turner R., 2009, *Point patterns of forest fire locations*, Environmental and ecological statistics, 16(2), 197–223.
- Ubysz B., 1992, *Požary i ich skutki w środowisku leśnym*, Postępy Techniki w Leśnictwie, 52, 73–79.
- Ubysz B., Szczygieł R., Piwnicki J., 2010, *Sytuacja pożarowa w Polsce*, Instytut Badawczy Leśnictwa, <https://www.ibles.pl/documents/17150/28287/Sytuacja%20pożarowa%20w%20Polsce> (dostęp: 29.12.2018).

- Vadrevu K.P., Badarinath K.V.S., Anuradha E., 2008, *Spatial patterns in vegetation fires in the Indian region*, Environmental monitoring and assessment, 147, 1–13.
- Vajda A., Venäläinen A., Suomi I., Junila P., Mäkelä H.M., 2014, *Assessment of forest fire danger in a boreal forest environment: description and evaluation of the operational system applied in Finland*, Meteorological Applications, 21(4), 879–887.
- Vega-García C., Chuvieco E., 2006, *Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes*, Landscape Ecology, 21(4), 595–605.
- Vélez R., 2002, *Causes of forest fires in the Mediterranean Basin*, Risk management and sustainable forestry. EFI Proceedings, 42, 35–42.
- Van Wagner C.E., 1987, *Development and structure of the canadian forest fireweather index system*, Canadian Forestry Service, Ottawa.
- Weibel P., 2009, *Modelling and assessing fire regimes in mountain forests of Switzerland*, ETH Zurich, doctoral dissertation.
- Wilkomirski B., Gutry P., 2010, *Zmiany przyrodnicze w ekosystemach pod wpływem pożarów środowiskowych*, Rocznik Świętokrzyski. Seria B–Nauki Przyrodnicze, 31, 95–110.
- Wotton B.M., Martell D.L., Logan K.A., 2003, *Climate change and people-caused forest fire occurrence in Ontario*, Climatic Change, 60(3), 275–295.
- Xu D., Shao G., Dai L., Hao Z., Tang L., Wang H., 2006, *Mapping forest fire risk zones with spatial data and principal component analysis*, Science in China Series E: Technological Sciences, 49(1), 140–149.
- Yin H.W., Kong F.H., Li X.Z., 2004, *RS and GIS-based forest fire risk zone mapping in da hinggan mountains*, Chinese geographical science, 14(3), 251–257.
- Zhang G., Liu F., Yang Z., 2003, *Study of Guangzhou's forest fire hazardous areas based on RS and GIS*, Journal of Central South Forestry University, 23(4), 62–66.
- Zinck R.D., Pascual M., Grimm V., 2011, *Understanding shifts in wildfire regimes as emergent threshold phenomena*, The American Naturalist, 178(6), E149–E161.