

Luiza WIECZOREK, Agnieszka PODSTAWCZYŃSKA
Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych*

WYBRANE UWARUNKOWANIA SYNOPTYCZNE INTENSYWNEJ TORNADOGENEZY W EUROPIE W LATACH 1998-2013

SELECTED SYNOPTIC CONDITIONS OF INTENSIVE TORNADOGENESIS IN EUROPE IN THE YEARS 1998-2013

Wstęp

Do zagrożeń środowiskowych o katastrofalnych skutkach przyrodniczych oraz społecznych zalicza się trąby powietrzne – ekstremalne zjawisko meteorologiczne o charakterze lokalnym, którego prognozowanie jest ciągłym wyzwaniem dla wszystkich służb pogodowych na świecie. W świetle współczesnych zmian klimatu rozwój systemów ostrzegania oraz sposobów reagowania na to zjawisko jest szczególnie priorytetowy. Rysem tych zmian jest wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia pogodowych zdarzeń ekstremalnych (IPCC 2007).

Wszystkie kontynenty, z wyjątkiem Antarktydy, są potencjalnie zagrożone występowaniem zjawiska trąby powietrznej – wiru powietrza o pionowej osi. Ciśnienie w środku wiru gwałtownie spada, przez co zaczyna on „zasysać” cząstki kurzu, pyłu, a nawet większe elementy. Dodatkowo zachodzi w nim jedna z przemian fazowych wody – kondensacja pary wodnej. W wyniku tych procesów wir staje się widoczny dla ludzkiego oka. Lej zwisający z chmury Cumulonimbus i stykający się z powierzchnią ziemi to zaledwie 10% całego procesu tornadogenezy (Grazulis 2003; Niedźwiedź 2003; Ahrens 2011). Najwyższa frekwencja tego fenomenu pogodowego występuje w Ameryce Północnej. Badacze amerykańscy są niekwestionowanym autorytetem w zakresie problematyki tornadogenezy, mając istotny, wieloletni wkład w poznanie tego ekstremalnego zjawiska meteorologicznego i rozwój metod jego prognozowa-

*Katedra Meteorologii i Klimatologii

nia (Huff i in. 1954; Fujita 1971; Davidson 1996; Rasmussen, Blanchard 1998; Grazulis 2003; Feuerstein i in. 2005; Markowski, Richardson 2009; Nariūnaite 2011; Edwards i in. 2013; Garner 2013; Muller 2013; Nastos, Matsangouras 2014).

W Europie pionierskie badania nad trąbami powietrznymi podjął na początku XX w. Alfred Wegener. Od tego czasu badania nad trąbami powietrznymi na Starym Kontynencie są systematycznie rozwijane i mają charakter wielowątkowy. W literaturze opisywano m.in. czasowo-przestrzenną zmienność zjawiska w Europie (Dotzek 2003; Hubrig 2004; Groenemeijer, Kuhne 2014; Taszarek, Brooks 2015; Antonescu i in. 2016), jego intensywność (Meaden 1976; Feuerstein i in. 2005), genezę (Lorenc 2012) czy prognozowanie.

Dorobek publikacyjny polskich autorów w zakresie tematyki związanej z trąbami powietrznymi nie jest bogaty, ale cechuje się różnorodnym podejściem badawczym. Studium przypadku trąby powietrznej zaprezentowali m.in. Gumiński (1936), Niedźwiedz i in. (2003), Parfiniewicz (2009a-b), Chmielewski (2013) czy Popławska (2014). Ujęcie czasowo-przestrzenne zjawiska trąb powietrznych na obszarze Polski zastosowali m.in. Lorenc (2012), Taszarek, Brooks (2015) oraz Wieczorek (2016). Na uwagę zasługują badania nad warunkami sprzyjającymi genezie zjawiska, które mają szczególne znaczenie dla poprawy metod prognozowania trąb powietrznych, np. Walczakiewicz i in. (2011), Taszarek (2013), Taszarek, Kolendowicz (2013).

Autorzy ostatniego z wymienionych opracowań opisują sytuacje synoptyczne, które mogą sprzyjać formowaniu się trąb powietrznych, m. in. uskoki prędkościowe i kierunkowe wiatru, przechodzenie frontów chłodnych czy też wysoki poziom chwiejności atmosfery. Zwracają także uwagę na inne czynniki, które mogą przyczyniać się do powstania zjawiska trąby powietrznej, np. występowanie w górnej troposferze prądu strumieniowego.

Celem niniejszej pracy jest rozszerzenie wiedzy na temat rodzajów sytuacji synoptycznych, podczas których występowało zjawisko intensywnej tornadogenezy. Dodatkowym celem było wyróżnienie położenia geograficznego obszarów pochodzenia mas powietrza, w jakich formowały się najsilniejsze trąby powietrzne w skali Fujity (F3 i F4) oraz analiza częstości adwekcji z wyznaczonych obszarów źródłowych. Jak dotąd zagadnienia te nie były szczegółowo prezentowane w literaturze klimatologicznej, a niniejsza praca ma w założeniu stanowić częściowe uzupełnienie studiów podejmowanych przez innych autorów analizujących podobny zakres danych obserwacyjnych.

Materiał źródłowy i metody badań

Baza danych dla potrzeb niniejszego opracowania składa się z części ogólnej i wyselekcjonowanej. Ogólna baza danych zawiera informacje o liczbie trąb powietrznych, współrzędnych miejsc ich występowania oraz sile w skali

Fujity (Fujita 1971). Powstała na podstawie analizy raportów European Severe Weather Database (ESWD) tworzonych przez zespół European Severe Storms Laboratory (ESSL). Pod uwagę brane były wyłącznie potwierdzone i w pełni zweryfikowane raporty dotyczące trąb powietrznych występujących na lądzie (Wieczorek 2016). W ten sposób pozyskano informacje o 1772 trąbach powietrznych dla obszaru całej Europy, z czego 102 przypadki dotyczyły obszaru Polski. Na tej podstawie opracowano ogólne tło klimatologiczne występowania tego zjawiska w Europie, m.in. jego czasowo-przestrzenny rozkład.

Baza danych wyselekcjonowanych powstała dla potrzeb realizacji zasadniczego celu pracy, tj. wyróżnienia sytuacji synoptycznych sprzyjających intensywnej tornadogenezie. Do analizy wybrano dni spełniające co najmniej jedno z dwóch kryteriów: 1) wystąpienie co najmniej dwóch trąb powietrznych w ciągu 12 godzin, w miejscach oddalonych od siebie nie więcej niż o 150 km (Potvin i in. 2000; Walczakiewicz i in. 2011), 2) trąby powietrzne wystąpiły jako sekwencja zjawiska podążającego za frontem atmosferycznym.

Stosując powyższe kryteria, bazę danych niniejszego opracowania uzupełniono o 680 dolnych map synoptycznych dla obszaru Europy (źródło danych: archiwum www.wetter3.de), które przeanalizowano pod kątem występowania układów barycznych i frontów atmosferycznych. Analizie poddano także mapy synoptyczne górne z poziomu 850 hPa, w dniach z wystąpieniem frontów górnych (źródło danych: archiwum www.wetter3.de). Dokonano pogłębionej analizy sytuacji meteorologicznej (m.in. map wskaźnika chwiejności atmosfery CAPE oraz map zachmurzenia konwekcyjnego) dla przypadków trąb powietrznych o sile F3 i F4 zaobserwowanych w chłodnej porze roku (X-III), będących osobiłością w miesiącach zimowych. Zimowe trąby powietrzne mają tendencje do szybszego przemieszczania się, stanowiąc tym samym większe niebezpieczeństwo (Groenemeijer, Kuhne 2014; Cook i in. 2017).

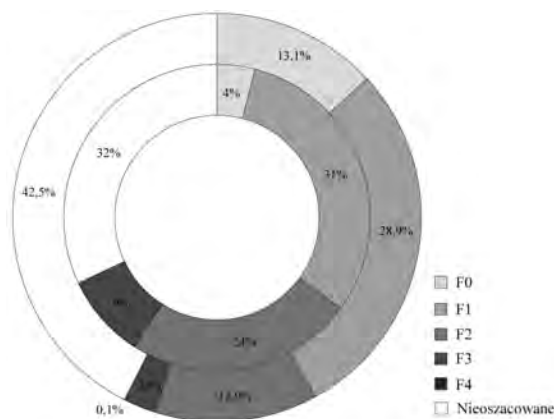
W opracowaniu wykorzystano także dane o trajektoriach wstecznych 72-godzinnych mas powietrza dla trzech poziomów wysokości (500 m, 2500 m i 5000 m), wyznaczone przy użyciu modelu NOAA HYSPLIT 4.1 (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), powszechnie wykorzystywanego w naukach przyrodniczych jako model transportu i dyspersji cząstek zawartych w atmosferze (Draxler, Rolph 2010). Przyjęte poziomy wysokości nawiązują do wysokości podstawy i rozciągłości pionowej chmur kłębiastych. Trajektorie wsteczne i położenie ich początków wyznaczono dla wszystkich 46 (w tym 9 z obszaru Polski) przypadków najsilniejszych trąb powietrznych obserwowanych w badanym wieloleciu 1998-2013 (o sile F3 i F4). Analiza trajektorii pozwoliła na określenie obszaru źródłowego pochodzenia geograficznego mas powietrza na trzy doby przed ich napływem nad miejsce powstania tornada.

Wyniki

W latach 1998-2013 w Europie, według potwierdzonych i w pełni zweryfikowanych raportów ESWD, wystąpiły 1772 trąby powietrzne, z czego 102 przypadki dotyczyły obszaru Polski. Trąby powietrzne w Europie, według skali Fujity, osiągały siłę F0 – <117 km/h (13,1% przypadków), F1 – 117-180 km/h (28,9%), F2 – 181-253 km/h (12,9%), F3 – 254-332 km/h (2,5%) i F4 – 333-418 km/h (0,1%) (rys. 1). W Polsce przypadki trąb powietrznych o sile F0 stanowiły 4%, o sile F1 – 31%, F2 – 24%, F3 – 9%.

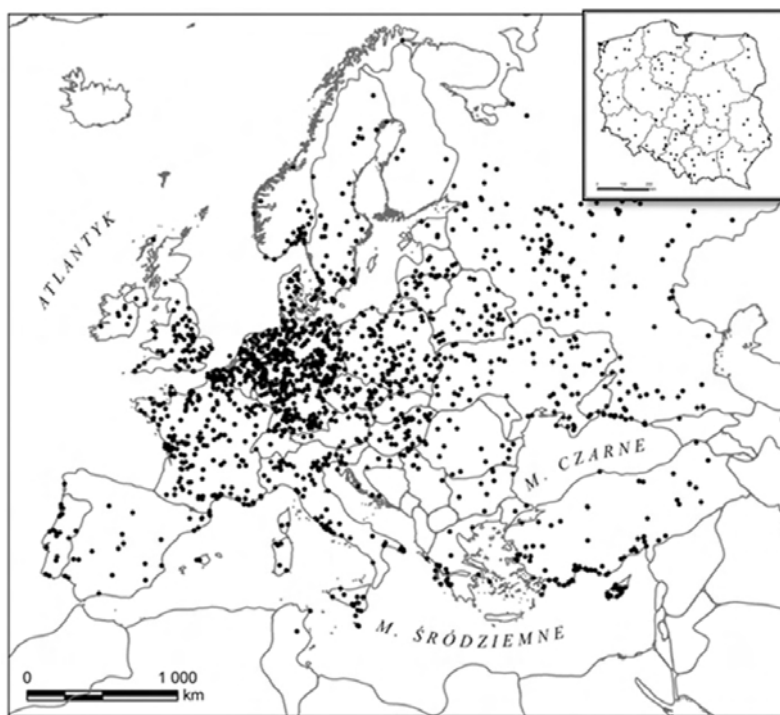
Z mapy przestrzennego rozkładu zgłaszanych raportów o trąbach powietrznych wynika, że najwięcej tego rodzaju zjawisk w badanym szesnastoleciu zaobserwowano w centrum Europy, głównie na terenie Niemiec. Na ten wynik wpływ pośredni ma popularność bazy ESWD w Niemczech i krajach sąsiednich (Taszarek, Brooks 2015). Liczne przypadki trąb powietrznych zaobserwowano także we Francji oraz w południowej części Wysp Brytyjskich (rys. 2). W Polsce najwięcej raportów zgłoszono dla centrum oraz południa kraju. Punkty na mapie Polski, jako współrzędne wystąpienia poszczególnych trąb powietrznych, grupują się w pasie o przebiegu południkowym od Małopolski, przez Polskę Środkową, po Kujawy (woj. małopolskie, śląskie, łódzkie, kujawsko-pomorskie). Na ten pasowy układ obszaru zwiększonego ryzyka tornadogenezy w Polsce zwrócili uwagę w swoich opracowaniach Lorenc (2012) oraz Taszarek i Brooks (2015), odnosząc go do kształtu amerykańskiej Alei Tornad.

Trąby powietrzne w Europie i w Polsce obserwowano najczęściej w porze letniej w godzinach popołudniowych, co ma bezpośredni związek z konwek-



Rys. 1. Częstość występowania trąb powietrznych wg skali Fujity w Europie (zewnętrzny pierścień) i dodatkowo w Polsce (wewnętrzny pierścień) w latach 1998-2013

Fig. 1. Frequency of occurrence of tornadoes according to Fujita scale in Europe (outer ring) and additionally in Poland (inner ring) in the years 1998-2013

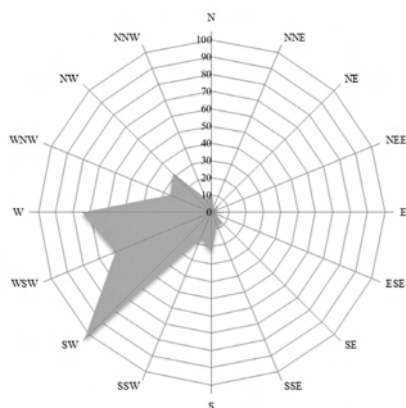


Rys. 2. Rozkład przestrzenny trąb powietrznych w Europie i w Polsce w latach 1998-2013 (opracowanie własne na podstawie ESWD)

Fig. 2. The spatial distribution of tornadoes in Europe and in Poland in the years 1998-2013 (own elaboration based on ESWD)

cją i rozwojem chmur kłębiastych. Najwięcej tego rodzaju zjawisk wpisuje się w przedział godzin wczesnopopołudniowych (12:00-15:00 UTC) dla Europy i późnopopołudniowych (15:00-18:00 UTC) dla Polski. Obszerną analizę zmienności czasowo-przestrzennej trąb powietrznych w Europie i w Polsce w latach 1998-2013 przedstawia opracowanie Wieczorek (2016).

Charakterystykę liczby trąb powietrznych w Europie w badanym szesnastoleciu uzupełniono o informację zamieszczoną tylko w 394 raportach ESWD (23% z ogólnej liczby w latach 1998-2013), co wynika z trudności zarejestrowania momentu zejścia leja trąby z podstawy chmury lub trudności obserwacji jego przemieszczania się już w kontakcie z powierzchnią ziemi. Na podstawie dostępnych, unikalnych danych ustalono, że dominującym kierunkiem początku szlaku przemieszczania się trąb powietrznych był kierunek południowo-zachodni (>100 przypadków, 25% badanej próby) i zachodni (>70 przypadków, 17% badanej próby) (rys. 3). Wskazane kierunki nawiązują do głównych kierunków adwekcji w sektorze europejskim (Degirmendzić, Kożuchowski 2016).



Rys. 3. Liczba trąb powietrznych w Europie na tle kierunku początku szlaku przemieszczania (opracowanie własne na podstawie danych z 394 raportów ESWD)

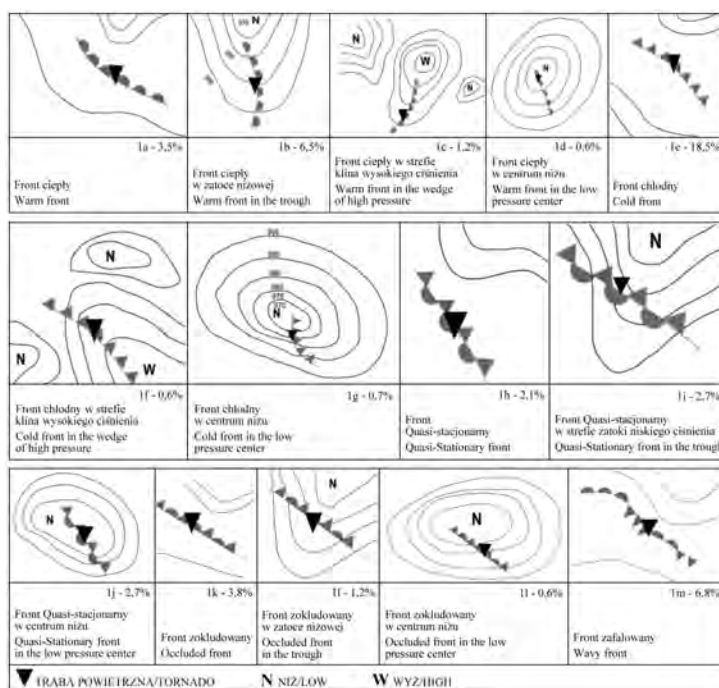
Fig. 3. Numbers of tornadoes in Europe against the direction of the beginning relocation path (own elaboration based on 394 reports from ESWD)

Warunki synoptyczne a zjawisko intensywniej tornadogenezy w Europie i w Polsce

Analiza dolnych map synoptycznych z obszaru Europy dla 680 wyselekcjonowanych dni, w których ogółem wystąpiło około 40% (718) przypadków trąb powietrznych z całego badanego okresu, pozwoliła na wydzielenie trzech rodzajów sytuacji synoptycznych sprzyjających tornadogenezie: 1 – związanych z frontami atmosferycznymi; 2 – bezfrontowych; 3 – związanych z frontami górnymi, słabnącymi i formującymi się. W każdym rodzaju sytuacji synoptycznej wyodrębniono określone typy warunków synoptycznych towarzyszących formowaniu się trąb powietrznych. Wśród sytuacji frontalnych 1. rodzaju wydzielono: 1a – front ciepły, 1b – front ciepły w strefie zatoki niskiego ciśnienia, 1c – front ciepły w strefie klina wysokiego ciśnienia, 1d – front ciepły w centrum niżu, 1e – front chłodny, 1f – front chłodny w strefie klina wysokiego ciśnienia, 1g – front chłodny w centrum niżu, 1h – front quasi-stacjonarny, 1i – front quasi-stacjonarny w strefie zatoki niskiego ciśnienia, 1j – front quasi-stacjonarny w centrum niżu, 1k – front zokludowany, 1l – front zokludowany w strefie zatoki niskiego ciśnienia, 1l – front zokludowany w centrum niżu, 1m – front zafalowany (rys. 4).

Wśród sytuacji bezfrontowych 2. rodzaju wyróżniono typy: 2a – centrum niżu, 2b – centrum wyżu, 2c – zatoka niżowa, 2d – klin wysokiego ciśnienia, 2e – strefa ciepłego wycinku niżu (rys. 5).

Sytuacje 3. rodzaju, tj. frontalne górne, słabnące i formujące się podzielono na następujące typy: 3a – górny front chłodny, 3b – górny front ciepły,



Rys. 4. Schematy typów warunków synoptycznych w sytuacjach z frontami atmosferycznymi i ich częstość podczas silnej tornadogenezy w Europie w latach 1998-2013

Fig. 4. Types of synoptic condition pattern within synoptic condition with atmospheric fronts and their frequency of occurrence corresponding to the intense tornadogenesis in Europe in the years 1998-2013

3c – górny front zokludowany, 3d – górny słabnący front zokludowany, 3e – słabnący front zokludowany, 3f – słabnący front ciepły, 3g – słabnący front chłodny, 3h – formujący się front chłodny, 3i – słabnący front stacjonarny (tab. 1).

Sytuacje 1. rodzaju, związane z frontami atmosferycznymi, stanowiły łącznie 51% analizowanych dni. Analiza frekwencji zjawiska tornadogenezy wykazała, że była ona największa w następujących typach warunków synoptycznych: bezpośrednio na froncie chłodnym (typ 1e – 18,5%), bezpośrednio na froncie zafalowanym (typ 1m – 6,8%), na froncie ciepłym znajdującym się w strefie oddziaływania zatoki niżowej (typ 1b – 6,5%) oraz bezpośrednio na froncie zokludowanym (typ 1k – 3,8%) (rys. 4).

Zjawisko intensywnej tornadogenezy w badanym szesnastolecu w sytuacjach 2. rodzaju (układach barycznych bez frontów atmosferycznych stanowiących ogółem 44%) występowało najczęściej w obszarze zatoki niskiego ciśnienia (typ 2c – 25,9%). W takich warunkach synoptycz-

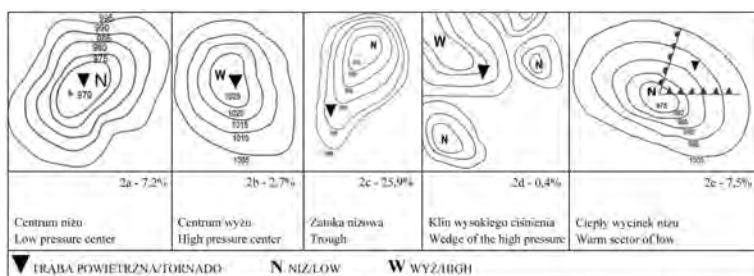
Tabela 1. Typy warunków synoptycznych w sytuacjach 3. rodzaju i ich częstość podczas silnej tornadogenezy w Europie w latach 1998-2013

Table 1. Types of synoptic condition pattern within synoptic condition No. 3 and their frequency of occurrence corresponding to the intense of tornadogenesis in Europe in the years 1998-2013

Lp.	Typ sytuacji synoptycznej Type of synoptic situation	Nr	Częstość Frequency [%]
1	Górny front chłodny Upper cold front	3a	1,0
2	Górny front ciepły Upper warm front	3b	1,0
3	Górny front zokludowany Upper occluded front	3c	0,4
4	Górny słabnący front zokludowany Upper occluded frontolysis	3d	0,3
5	Słabnący front zokludowany Occluded frontolysis	3e	0,4
6	Słabnący front ciepły Warm frontolysis	3f	0,4
7	Słabnący front chłodny Cold frontolysis	3g	0,9
8	Słabnący front stacjonarny Stationary frontolysis	3h	0,2
9	Formujący się front chłodny Cold frontogenesis	3i	0,3

nych zawsze panuje wysokie ryzyko konwekcji oraz intensywnych opadów atmosferycznych. Kolejnym typem sytuacji sprzyjającej tworzeniu się trąb powietrznych w warunkach bezfrontalnych było centrum niżu – 7,2% (typ 2a) oraz ciepły wycinek niżu – 7,5% (typ 2e). Pojedyncze przypadki trąb powietrznych dotyczyły klina wysokiego ciśnienia (typ 2d – 0,4%) (rys. 5).

Sytuacje synoptyczne 3. rodzaju występujące podczas silnej tornadogenezy sklasyfikowano ze względu na obecność frontów słabnących (typ zokludowany – 3e, ciepły – 3f, chłodny – 3g, i stacjonarny – 3h), frontu formującego się (typ chłodny – 3i) oraz górnych frontów atmosferycznych na poziomie 850hPa (typ chłodny – 3a, ciepły – 3b, zokludowany – 3c, słabnący zokludowany – 3d). Dziewięć wymienionych typów synoptycznych stanowiło najmniejszy odsetek (tylko 5%) wśród analizowanych warunków atmosferycznych podczas intensywnej tornadogenezy (tab. 1). Fronty górne to powierzchnie rozdzielające dwie masy powietrza o odmiennych cechach fizycznych, ale na wysokości co najmniej 1,5 km – przypadki analizowane w niniejszej pracy dotyczyły tej wysokości. Fronty górne towarzyszyły trąbom powietrznym w 2,8% analizowanych dni (tab. 1), co wskazuje na mniejszą rolę konwekcji termicznej przy powstawaniu



Rys. 5. Schematy typów warunków synoptycznych w sytuacjach bezfrontowych i ich częstość podczas silnej tornadogenezy w Europie w latach 1998-2013

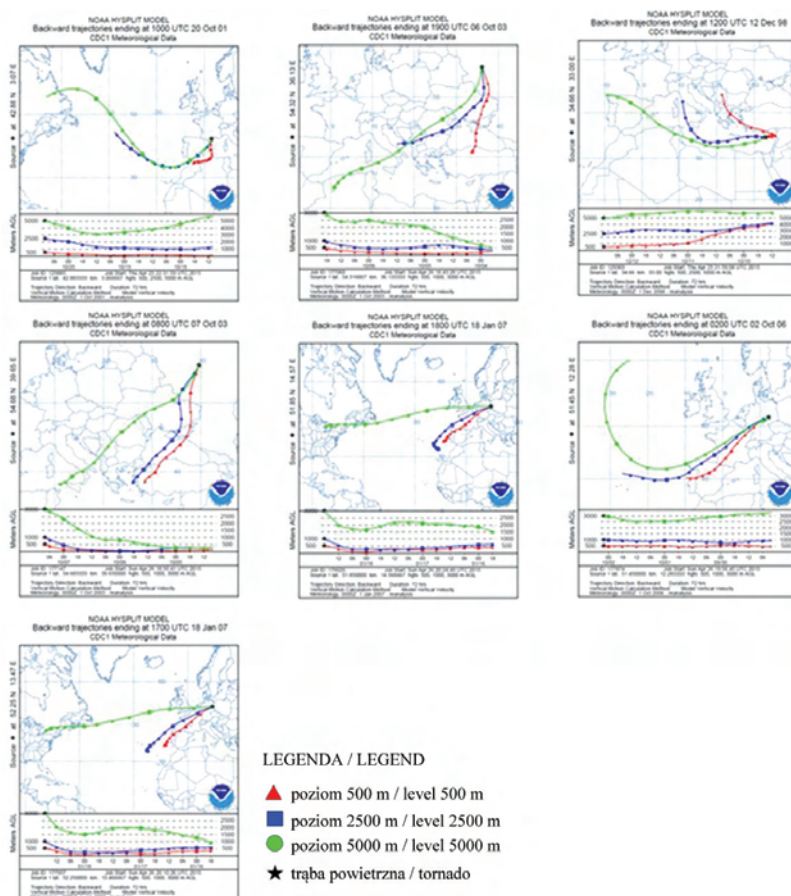
Fig. 5. Types of synoptic condition pattern within synoptic condition without atmospheric fronts and their frequency of occurrence corresponding to the intense tornadogenesis in Europe in the years 1998-2013

tego zjawiska. Fronty górne, jako czynnik dynamiczny, wpływały bezpośrednio na wzrost chwiejności atmosfery na analizowanym poziomie i zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia trąby powietrznej. Dni z frontogenezą oraz frontolizą – sytuacjami, gdy cechy właściwe dla dojrzałego stadium frontu nie są w pełni rozwinięte lub już zanikają – stanowiły łącznie 2,2% dni z intensywną tornadogenezą (tab. 1).

Położenie geograficzne źródłowej strefy zasilającej adwekcje mas powietrza w przypadkach najsilniejszej tornadogenezy

72-godzinne trajektorie wsteczne ruchu powietrza dla poziomów 500 m, 2500 m i 5000 m wykorzystano do określenia typu mas powietrza, które napłynęły nad miejsce najsilniejszej tornadogenezy (trąby o sile F3 i F4) oraz wyznaczenia położenia geograficznego ich obszaru źródłowego. W pierwszym etapie analizy dokonano podziału na masy powietrza pochodzenia morskiego i kontynentalnego na poszczególnych poziomach. Na podstawie 138 trajektorii (łącznie dla wszystkich poziomów) stwierdzono przewagę powietrza morskiego (59%) w stosunku do kontynentalnego (41%). Na wysokości 500 m powietrze pochodzenia morskiego stanowiło 41%, a kontynentalnego – 59%. Na wysokości 2500 m sytuacja uległa zmianie, udział powietrza morskiego wyniósł 65%, natomiast kontynentalnego – pozostałe 35%. Na wysokości 5000 m sytuacja wyglądała podobnie – 70% stanowiło powietrze morskie i 30% kontynentalne. Znacząca większość przypadków silnych trąb powietrznych (85%) wystąpiła w ciepłej porze roku (IV-IX). Na chłodną część roku (X-III) przypadło pozostałe 15% trąb powietrznych o sile co najmniej F3, które uznano za przypadki szczególne w analizowanym szesnastoleciu. Rysunek 6 przedstawia mapy trajektorii wstecznych dla wszystkich siedmiu trąb powietrznych z chłodnej połowy roku.

Wnioski płynące z ich analizy, biorąc pod uwagę ogólny podział mas powietrza na morskie i kontynentalne, wskazują na przewagę adwekcji powietrza morskiego (57%) towarzyszącego silnej tornadogenezie w porze chłodnej. Analiza trajektorii dla trzech wysokości nad gruntem wykazała zróżnicowanie między poziomami – na poziomie 500 m w czasie silnych trąb powietrznych dominuje powietrze kontynentalne (57%), natomiast na poziomie 2500 m w badanych siedmiu przypadkach miała miejsce tylko adwekcja powietrza morskiego. Na poziomie 5000 m powietrze morskie napływało w 71%, kontynentalne – w 29% analizowanych przypadków (rys. 6).



Rys. 6. 72-godzinne trajektorie wsteczne mas powietrza dla poziomów 500 m, 2500 m, 5000 m w dniach z intensywną tornadogenezą w porze chłodnej (X-III, wszystkie analizowane przypadki F3 i F4) w Europie w latach 1998-2013

Fig. 6. 72-hour backward trajectory of air masses at levels 500 m, 2500 m and 5000 m in the days with the intense tornadogenesis in the cold season (Oct-Mar, all analyzed cases of F3 and F4) in Europe in the years 1998-2013

Tabela 2. Położenie geograficzne obszaru pochodzenia mas powietrza na wysokości 500 m, 2500 m i 5000 m napływających nad obszar występowania trąb powietrznych o sile F3 i F4 w Europie w latach 1998-2013 oraz częstość adwekcji z wyróżnionych geograficznych stref źródłowych

Table 2. Geographical location source of air masses fetch at level 500 m, 2500 m and 5000 m over the site of the intense tornado F3 and F4 in Europe in the years 1998-2013 and the frequency of occurrence of air masses fetch from distinguished sources area

Lp.	Obszar pochodzenia mas powietrza Source of air masses fetch	500 m [%]	2500 m [%]	5000 m [%]
1	Afryka Północna North Africa	2,2	2,2	6,5
2	Atlantyk Północny (część N, w tym Morze Północne) North Atlantic (part N, including the North Sea)	2,2	4,3	6,5
3	Atlantyk Północny (część E) North Atlantic (part E)	10,9	21,7	8,7
4	Atlantyk Północny (część środkowa) North Atlantic (middle part)	4,3	10,9	23,9
5	Europa Środkowa Central Europe	13,0	2,2	6,5
6	Morze Czarne Black Sea	13,0	6,5	4,3
7	Morze Śródziemne Mediterranean Sea	10,9	21,7	26,1
8	Nizina Nadkaspijska Caspian Lowland	4,3	2,2	0,0
9	Półwysep Apeniński Apennine Peninsula	2,2	4,3	6,5
10	Półwysep Azja Mniejsza Asia Minor Peninsula	4,3	0,0	0,0
11	Półwysep Bałkański Balkan Peninsula	15,2	17,4	2,2
12	Półwysep Iberyjski Iberian Peninsula	8,7	2,2	2,2
13	Półwysep Labrador Labrador Peninsula	0,0	0,0	2,2
14	Nizina Atlantycka (USA) Atlantic Lowland (USA)	0,0	0,0	4,3
15	Wyspy Brytyjskie British Islands	2,2	2,2	0,0
16	Wyżyna Podolska Podolska Upland	6,5	2,2	0,0

Analiza dostępnych map wskaźnika energii potencjalnej CAPE w czterech dniach z trąbami powietrznymi w porze chłodnej (wszystkie dostępne mapy CAPE z analizowanego okresu) wykazała słabą chwiejność atmosfery w czasie

tornadogenezy (przedział 0-999 J/kg wg opracowania Siedleckiego 2011). W trzech przypadkach wskaźnik CAPE zawierał się w granicach 10-50 J/kg, a w jednym osiągnął wartość 900 J/kg (20.10.2001 – Francja). W dniu z najsłabszą chwiejnością atmosfery, tj. 10 J/kg (02.10.2006 – Niemcy), występowało bardzo małe zachmurzenie konwekcyjne (0-15%). Czynnikiem determinującym wystąpienie trąby powietrznej mógł być tego dnia front zokludowany, który znajdował się w obszarze tornadogenezy. W pozostałych dniach z CAPE na poziomie 50 J/kg chmury konwekcyjne pokrywały niebo w 80%. Opisane przypadki wskazują, że silna chwiejność atmosfery nie była warunkiem koniecznym do zaistnienia procesu intensywnej tornadogenezy w porze chłodnej.

W kolejnym etapie badań skoncentrowano się na wyznaczeniu obszarów pochodzenia mas powietrza, w których formowały się wybrane, silne trąby powietrzne. Tabela 2 przedstawia w układzie alfabetycznym położenie geograficzne stref źródłowych mas powietrza napływających nad obszary o intensywnej tornadogenezie (F3 i F4). Obszar, na którym położone były początki 72-godzinnych trajektorii wstecznych mas powietrza z formującymi się silnymi trąbami powietrznymi w Europie, był ograniczony równoleżnikami 25°N i 57°N oraz południkami 70°W i 25°E. Szczegółowa analiza położenia początków 3-dobowych trajektorii pozwoliła na wyodrębnienie szesnastu obszarów pochodzenia mas powietrza. Częstość adwekcji z tych stref źródłowych wskazuje, że znacząco wyróżnia się obszar Morza Śródziemnego, skąd odnotowano 10,9% przypadków adwekcji na poziomie 500 m oraz ponad 20% przypadków na poziomach 2500 m i 5000 m. W rozkładzie częstości adwekcji dla poziomu 500 m dominują (ponad 10%) następujące strefy źródłowe: Półwysep Bałkański, Morze Czarne, Europa Środkowa, Morze Śródziemne oraz wschodnia część północnego Atlantyku. W przypadku poziomu 2500 m najwyższą (21,7%) częstością cechują się adwekcje z obszarów Morza Śródziemnego i wschodniej części północnego Atlantyku oraz Półwyspu Bałkańskiego (17,4%), a także ze środkowej części północnego Atlantyku (10,9%). Dla poziomu 5000 m wyróżniają się znacząco dwie strefy zasilania adwekcji, tj. Morze Śródziemne (26,1%) oraz środkowa część północnego Atlantyku (23,9%). Pozostałe obszary źródłowe mas powietrza na tym poziomie cechują częstości w zakresie od 0 do 9% (tab. 2).

Omówienie wyników

Baza danych o trąbach powietrznych European Severe Weather Database (ESWD), wykorzystana w niniejszej pracy, stanowiła także materiał źródłowy najnowszych studiów klimatologicznych dotyczących trąb powietrznych w Europie (Groenemeijer, Kühne 2014; Taszarek, Brooks 2015; Antonescu i in. 2016; Wieczorek 2016). Antonescu i in. (2016) w przeglądowym artykule

opartym o analizę danych dla trzydziestu krajów podają, że udział poszczególnych klas intensywności trąb powietrznych (znana intensywność zjawiska dla 5187 z 9563 przypadków odnotowanych od początku naszej ery do roku 2013) kształtował się następująco: F0 i F1 – 74,5%, F2 i F3 – 24,5%, F4 i F5 – 0,8%. Groenemeijer i Kühne (2014), opierając się na 3818 raportach z bazy ESWD, podają następujący udział klas intensywności tornad: F0 i F1 – 65%, F2 i F3 – 33,7%, F4 i F5 – 1,3%. Roczna liczba ofiar śmiertelnych w Europie w konsekwencji wystąpienia trąby powietrznej to według tej grupy badawczej 10-15 osób. Najwięcej raportów o trąbach powietrznych w bazie ESWD, jak podają Groenemeijer i Kühne (2014), pochodzi z obszaru Niemiec, Holandii, Belgii, Francji, Austrii, Czech i Polski. Niestety nie ma w Europie obszaru wolnego od zagrożenia tym zjawiskiem (również trąbami o sile F4 i F5). Trąby powietrzne mogą wystąpić w ciągu całego roku z maksimum w okresie czerwiec-sierpień w godz. 13:00-15:00 UTC na znacznym obszarze Europy. Wyjątek stanowi południowa część kontynentu, gdzie największa frekwencja przypada na okres sierpień-listopad, godz. 09:00-11:00 UTC (Groenemeijer, Kühne 2014; Antonescu i in. 2016). Taszarek i Brooks (2015) dokonali kompleksowej analizy klimatologicznej trąb powietrznych w Polsce dla dwóch okresów (1899-1998 oraz 1999-2013), podając, że średnio odnotowuje się każdego roku sześć do dziesięciu zjawisk z maksimum częstości w okresie maj-wrzesień w godz. 15:00-18:00 UTC.

Pomimo wielokrotnego podejmowania wątku analiz warunków synoptycznych sprzyjających tornadogenezie, zjawisko to, zwłaszcza w kontekście prognostycznym, należy uznać za wciąż niedostatecznie poznane. Zasadniczy wniosek płynący z większości opracowań (Galway 1977; Davies-Jones 2001; Homar i in. 2001; Przybylak 2007; Dial 2010; Lorenc 2012; Taszarek 2013; Taszarek, Brooks 2015) to znacząca rola chłodnych frontów atmosferycznych i obszarów niskiego ciśnienia dla procesu formowania trąb powietrznych, co również wykazano w prezentowanym opracowaniu. Taszarek i Kolendowicz (2013) oraz Walczakiewicz i in. (2011) w badaniach wskaźników chwiejności atmosfery podczas tornadogenezy wskazują na środowisko umiarkowanie i mało chwiejne towarzyszące najsilniejszym trąbom powietrznym – co odnotowano także w szczegółowo analizowanych przypadkach trąb powietrznych pory chłodnej opisywanych w tej pracy. W niniejszej pracy rozwinięto wątek analizy różnorodności sytuacji synoptycznych towarzyszących najsilniejszej tornadogenezie, badając także wpływ frontolizy oraz frontogenezy, a także frontów górnych na silną tornadogenezę. Syntezą badań jest wizualizacja danych w postaci schematów typów sytuacji synoptycznych podczas silnej tornadogenezy, co może być wykorzystane w dalszych analizach dla celów prognostycznych. W niniejszym opracowaniu rozwinięto także wątek jak dotąd nieporuszony w opracowaniach z zakresu klimatologii trąb powietrznych, tj. wyróżniono położenie geograficzne obszarów pochodzenia mas powietrza,

w jakich formowały się najsilniejsze trąby powietrzne (F3 i F4 w skali Fujity) oraz wyznaczono częstość adwekcji z określonych obszarów źródłowych.

Pomimo licznych badań cząstkowych na świecie, w Europie i w Polsce dotyczących tornadogenezy, trąby powietrzne są wciąż niedostatecznie poznanym elementem klimatu. W świetle tego nowe opracowania dotyczące uwarunkowań synoptycznych występowania trąb powietrznych mogą być przyczynkiem do polepszania prognozy tego zjawiska i rozwoju specjalistycznych systemów ostrzegania (Taszarek 2013). Jak podaje Groenemeijer i Kühne (2014) tylko siedem spośród trzydziestu dziewięciu Europejskich Serwisów Pogodowych posiada procedury ostrzegania przed trąbami powietrznymi, a klimatolodzy zwracają uwagę, że coraz częściej obserwuje się wzrost intensywności tego zjawiska (IPCC 2007; Lorenc 2009). Sytuacja ta skłania do podejmowania nowych badań nad mechanizmami powstawania trąb powietrznych i warunków im sprzyjających.

Wnioski

Analiza uwarunkowań synoptycznych intensywnej tornadogenezy w Europie i w Polsce w latach 1998-2013 oraz położenia geograficznego obszarów źródłowych mas powietrza towarzyszących trąbom powietrznym o sile F3 i F4 (prędkość wiatru powyżej 250 km/h) pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Około 40% (718 przypadków) trąb powietrznych, które wystąpiły w badanym okresie, powstało w procesie intensywnej tornadogenezy, zdefiniowanej w niniejszym opracowaniu przez wystąpienie co najmniej dwóch trąb powietrznych w ciągu 12 godzin w miejscach oddalonych od siebie maksymalnie o 150 km lub wystąpienie trąb powietrznych jako sekwencji zjawiska podążającego za frontami atmosferycznymi.
2. Wyróżniono trzy główne rodzaje sytuacji synoptycznych, z którymi związana jest intensywna tornadogeneza oraz dwadzieścia osiem typów sytuacji synoptycznych. Sytuacje z frontami atmosferycznymi stanowiły największą grupę badanych dni (49%). Sytuacje z frontogenezą, frontolizą oraz frontami górnymi wystąpiły tylko w 5% dni z intensywną tornadogenezą. Wśród typów sytuacji synoptycznych najczęściej sprzyjających powstawaniu trąb powietrznych znalazły się front chłodny oraz zatoka niskiego ciśnienia.
3. Intensywna tornadogeneza w porze chłodnej zaistniała w warunkach słabej energii chwiejności atmosfery wynoszącej 10-900 J/kg (dane o wartości wskaźnika CAPE dostępne tylko dla czterech spośród siedmiu przypadków), co wskazuje na rolę innych czynników warunkujących proces powstawania trąb powietrznych.

4. W miejscach wystąpienia trąb powietrznych o sile F3 i F4, które stanowiły tylko 3% ogółu trąb powietrznych w badanym okresie, częstość adwekcji mas powietrza morskiego na poziomie 2500 m i 5000 m była znacząco wyższa niż kontynentalnego i wynosiła odpowiednio 65% i 70%. Natomiast na poziomie 500 m dominowały adwekcje powietrza kontynentalnego, z frekwencją wynoszącą 59%. Przewaga frekwencji powietrza morskiego na poziomie 2500 m i 5000 m w czasie intensywnych tornad dotyczy ciepłej i chłodnej pory roku.
5. Wśród szesnastu geograficznych obszarów pochodzenia mas powietrza napływających nad miejsca intensywnej tornadogenezy w Europie trzy obszary zasilają te adwekcje najczęściej, tj. Morze Śródziemne, środkowa i wschodnia część północnego Atlantyku oraz Półwysep Bałkański.

L i t e r a t u r a

- Ahrens C.D., 2011, *Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*, Cengage Learning, 528 s.
- Antonescu B., Schultz D.M., Lomas F., Kühne T., 2016, Tornadoes in Europe: synthesis of the observational datasets, *Monthly Weather Review*, 144 (7), 2445-2480, DOI: 10.1175/MWR-D-15-0298.1
- Chmielewski T., Nowak N., Walkowiak I.K., 2013, Tornado in Poland of August 15, 2008: results of post-disaster investigation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 118, 54-60, DOI: 10.1016/j.jweia.2013.04.007
- Davidson K., 1996, *Twister: the science of tornadoes and the making of a natural disaster movie*, Gallery Books, 240 s.
- Degirmendzić J., Kozuchowski K., 2006, O drogach i kierunkach adwekcji mas powietrza nad obszar Polski, [w:] *Klimatyczne aspekty środowiska geograficznego*, J. Trepińska, Z. Olecki (red.), IGiGP UJ, Kraków, 341-350
- Dial G.L., Racy J.P., Thompson R.L., 2010, Short-term convective mode evolution along synoptic boundaries, *Weather Forecasting*, 25 (5), 1430-1446, DOI: 10.1175/2010WAF2222315.1
- Dotzek N., 2003, An updated estimate of tornado occurrence in Europe, *Atmospheric Research*, 67-68, 153-161, DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00049-8
- Draxler R.R., Rolph G.D., 2010, HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, dostępne online <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (09.04.2018)
- Edwards R., LaDue J.G., Ferree J.T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W.L., 2013, Tornado intensity estimation: past, present and future, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (5), 641-653, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1

- Feuerstein B., Dotzek N., Grieser J., 2005, Assessing a tornado climatology from global tornado intensity distributions, *Journal of Climate*, 18 (4), 585-596, DOI: 10.1175/JCLI-3285.1
- Fujita T.T., 1971, Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, *SMRP Research Paper*, 91, 42 s.
- Galway J., 1977, Some climatological aspects of tornado outbreaks, *Monthly Weather Review*, 105 (4), 477-484, DOI: 10.1175/1520-0493(1977)105<0477:SCAOTO>2.0.CO;2
- Garner J., 2013, A study of synoptic-scale tornado regimes, *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 8 (3), 1-25
- Grazulis T.P., 2003, *The tornado – nature's ultimate windstorm*, University of Oklahoma Press, 348 s.
- Groenemeijer P.H., Kühne T., 2014, A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database, *Monthly Weather Review*, 142 (12), 4775-4790, DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1
- Gumiński R., 1936, Trąba powietrzna pod Lublinem w dniu 20 lipca 1931 r., *Wiadomości Meteorologiczne i Hydrologiczne*, 16, 7-9
- Homar V., Gayà M., Ramis C., 2001, A synoptic and mesoscale diagnosis of a tornado outbreak in the Balearic Islands, *Atmospheric Research*, 56 (1-4), 31-55, DOI: 10.1016/S0169-8095(00)00087-9
- Hubrig M., 2004, Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen, *Forst und Holz*, 59, 78-84
- Huff F.A., Hisser H.W., Bigler S.G., 1954, Study of an Illinois tornado using radar, synoptic weather and field survey data, Report of Investigation No. 22, State Water Survey Division, Urbana, IL, 73 s.
- Lorenc H., 2009, Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo, zadanie 4, projekt KLIMAT, IMGW, Warszawa
- Lorenc H., 2012, Struktura maksymalnych prędkości wiatru w Polsce, [w:] Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo, tom 3: Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju, H. Lorenc (red.), IMGW-PIB, Warszawa, 33-59
- Markowski P., Richardson Y., 2009, Tornadogenesis: our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research, *Atmospheric Research*, 93 (1-3), 3-10, DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.09.015
- Meaden G.T., 1976, Tornadoes in Britain: their intensities and distribution in space and time, *Journal of Meteorology*, 1 (8), 242-251
- Muller R.A., 2013, The truth about tornadoes, *The New York Times*, dostępne online <https://www.nytimes.com/2013/11/21/opinion/the-truth-about-tornadoes.html> (09.04.2018)
- Nariūnaitė I., 2011, Extreme weather event – tornado – in Lithuania on 27 July 2011, dostępne online https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_CONF_P61_S7_07_NARIUNAI_P&RevisionSelecti onMethod=LatestReleased&Rendition=Web (09.04.2018)

- Nastos P.T., Matsangouras I.T., 2014, Analysis of synoptic conditions for tornadic days over western Greece, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 (9), 2409-2421, DOI: 10.5194/nhess-14-2409-2014
- Niedźwiedz T., German K., Sadowski P., 2003, Synoptic conditions of the tornado occurrence in the Podhale region on 29 May 2001 and its natural and economic impacts, *Prace Geograficzne*, 112, 55-67
- Parfiniewicz J., 2009a, Tornado w rejonie Częstochowy – 20 lipca 2007 roku. Część I: analiza synoptyczna, *Przegląd Geofizyczny*, 54 (3-4), 147-159
- Parfiniewicz J., 2009b, Tornado w rejonie Częstochowy – 20 lipca 2007 roku. Część II: symulacje komputerowe i analiza 3D, *Przegląd Geofizyczny*, 54 (3-4), 161-182
- Popławska J., 2014, Tornada superkomórkowe w Polsce – studium przypadku z 15 sierpnia 2008, *Prace i Studia Geograficzne*, 56, 205-229
- Potvin C.K., Elmore K.L., Weiss S.J., 2010, Assessing the impacts of proximity sounding criteria on the climatology of significant tornado environments, *Weather and Forecasting*, 25 (3), 921-930, DOI: 10.1175/2010WAF2222368.1
- Rasmussen E.N., Blanchard D.O., 1998, A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters, *Weather and Forecasting*, 13 (4), 1148-1164, DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2
- Siedlecki M., 2011, Charakterystyka klimatologiczna chwiejności atmosfery nad Europą, *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica*, 11, 204 s.
- Taszarek M., 2013, Możliwość prognozowania trąb powietrznych w Polsce, *Przegląd Geograficzny*, 85 (3), 353-371
- Taszarek M., Brooks H.E., 2015, Tornado climatology of Poland, *Monthly Weather Review*, 143 (3), 702-717, DOI: 10.1175/MWR-D-14-00185.1
- Taszarek M., Kolendowicz L., 2013, Sounding-derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and Universal Tornado Index, *Atmospheric Research*, 134, 186-197, DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.07.016
- Walczakiewicz S., Ostrowski K., Surowiecki A., 2011, Warunki synoptyczne występowania trąb powietrznych w Polsce w latach 2001-2010, *Prace Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego*, 70, 43-52
- Wieczorek L., 2016, Zmienność czasowo-przestrzenna występowania trąb powietrznych w Europie i w Polsce w latach 1998-2013, *Przegląd Geograficzny*, 88 (3), 353-368
- IPCC 2007, *Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, IPCC, Genewa, 104 s.

S t r e s z c z e n i e

Głównym celem pracy było wyróżnienie rodzajów sytuacji synoptycznych, podczas których występowało zjawisko intensywnej tornadogenezy. Dodatkowym celem opracowania było wskazanie położenia geograficznego obszarów pochodzenia mas powietrza, w jakich formowały się najsilniejsze trąby powietrzne w skali Fujity (F3 i F4) oraz analiza

częstości adwekcji z wyznaczonych obszarów źródłowych. Baza danych niniejszej pracy składała się z części ogólnej (w pełni zweryfikowane raporty European Severe Weather Database o liczbie, sile i miejscu wystąpienia trąb powietrznych w latach 1998-2013 – 1772 trąb powietrznych z obszaru Europy, w tym 102 przypadki w granicach Polski) oraz bazy wyselekcjonowanej, zawierającej dane m.in. o trąbach powietrznych występujących w trakcie zjawiska intensywnej tornadogenezy, towarzyszących im dolnych i górnych sytuacjach synoptycznych (mapy z archiwum www.wetter3.de), 72-godzinnych trajektorii wstecznych mas powietrza napływających nad miejsce wystąpienia trąb powietrznych o sile F3 i F4 (wykorzystano model NOAA HYSPLIT 4.1).

Zjawisko intensywnej tornadogenezy zdefiniowano jako wystąpienie co najmniej dwóch trąb powietrznych w ciągu 12 godzin w miejscach oddalonych od siebie maksymalnie o 150 km lub wystąpienie trąb powietrznych jako sekwencji zjawiska podążającego za frontami atmosferycznymi. Kryterium procesu intensywnej tornadogenezy spełniło 40% (718) trąb powietrznych w badanym okresie. Wyróżniono trzy główne sytuacje synoptyczne w dniach intensywnej tornadogenezy, tj. z frontami atmosferycznymi (51%), bezfrontowe (44%), z frontogenezą, frontolizą oraz frontami górnymi (5%). Łącznie główne sytuacje synoptyczne podzielono na 28 typów, z czego front chłodny oraz zatoka niskiego ciśnienia najczęściej towarzyszyły zjawisku intensywnej tornadogenezy. Silne trąby powietrzne o prędkości wiatru powyżej 250 km/h (F3 i F4) stanowiły tylko 3% (46) przypadków w badanym okresie. Analiza szlaków przemieszczania się mas powietrza trzy doby przed adwekcją nad miejsce obserwacji silnych trąb powietrznych wykazała przewagę powietrza morskiego nad kontynentalnym na poziomach 2500 m i 5000 m, a kontynentalnego nad morskim na wysokości 500 m.

Wyróżniono szesnaście geograficznych obszarów pochodzenia mas powietrza 72-godz. przed napływem nad miejsca intensywnej tornadogenezy w Europie, ograniczonych równoleżnikami 25°N i 57°N oraz południkami 70°W i 25°E. Morze Śródziemne, środkowa i wschodnia część północnego Atlantyku i Półwysep Bałkański to obszary, które najczęściej zasilają adwekcje nad miejsca intensywnej tornadogenezy.

Słowa kluczowe: trąba powietrzna, Europa, Polska, warunki synoptyczne, masy powietrza.

S u m m a r y

The main purpose of this study was to distinguish types of synoptic situations corresponding to the intense tornadogenesis. An additional objectives of the study were to indicate the geographical location of air masses source in which the intense tornado (F3 and F4, Fujita scale) were formed, and analysis of the frequency of air masses fetch from the designated source areas.

The database of this work consisted of a general part (entirely verified reports of the European Severe Weather Database on the number, strength and location of tornadoes

in 1998-2013, i.e. 1772 tornadoes from Europe, including 102 cases within Poland) and a selected database containing the data: about tornadoes occurring during the intense tornadogenesis, accompanying lower and upper synoptic situations (maps from the archive www.wetter3.de), 72-hour backward trajectories of air masses fetch over the site of the intense tornados F3 and F4 (using NOAAHYSPIT 4.1 model).

The phenomenon of the intense tornadogenesis was defined in this study as the occurrence of two tornadoes within 12 hours at least in the sites located up to 150 km or the occurrence of tornadoes as a sequence of phenomena following the atmospheric fronts. There were 40% (718) cases of tornadoes within the intense tornadogenesis in analyzed period.

Three main synoptic situations were distinguished in the days of intense tornadogenesis, i.e. with atmospheric fronts (51%), without atmospheric fronts (44%), with frontogenesis, frontolysis and upper fronts (5%). In total, the main synoptic situations were divided into 28 types, of which the cold front and the trough most often corresponded to the phenomenon of intense tornadogenesis.

The intense tornadoes with wind speeds above 250 km/h (F3 and F4) occurred in 3% (46) cases in the analyzed period. Analysis of the 3-day air masses backward trajectories revealed the dominance of maritime air masses at 2500 m and 5000 m levels, and the continental air masses at 500 m level within the intense tornadoes occurrences.

There were 16 geographical sources of air masses fetch over of the site of intense tornadogenesis in Europe, limited by latitudes of 25°N and 57°N and longitudes of 70°W and 25°E. Mediterranean Sea, the central and the eastern part of the North Atlantic, Balkan Peninsula are the areas that most often supplied air masses fetch over the sites of the intense tornadogenesis.

Key words: tornado, Europe, Poland, synoptic conditions, air masses.