

Możliwości prognozowania trąb powietrznych w Polsce

Forecasting the possible emergence of tornadoes in Poland

MATEUSZ TASZAREK

Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, ul. Dziegiełowa 27;
tornado@amu.edu.pl

Zarys treści. Artykuł zawiera ocenę obecnych możliwości prognozowania trąb powietrznych w Polsce. Autor dokonuje przeglądu literatury związanej z mechanizmami powstawania trąb powietrznych oraz klimatycznymi uwarunkowaniami tego zjawiska w Polsce. Na podstawie aktualnych osiągnięć nauki oraz sposobów obecnie wykorzystywanych przez synoptyków, opisuje 3 metody (numeryczne modele pogody, nowcasting oraz sondowania atmosferyczne), używane przy wydawaniu ostrzeżeń oraz prognozowaniu trąb powietrznych. Na ich podstawie, autor wyznacza 4 poziomy operacyjne, na których możliwe jest wydawanie prognoz i ostrzeżeń dotyczących możliwości powstania trąby powietrznej. Analiza wykazała, że Polska dysponuje odpowiednią infrastrukturą radarową do szczegółowego monitorowania echa radarowego związanego z superkomórką, jednak ze względu na małą skalę zjawiska nie ma jeszcze rozwiniętych specjalistycznych systemów ostrzegania.

Słowa kluczowe: trąba powietrzna, niebezpieczne zjawiska meteorologiczne, Polska, prognozowanie, superkomórka, tornadogeneza.

Wstęp

Tornado – czyli gwałtownie wirująca kolumna powietrza, rozciągająca się w pionie od poziomu kondensacji chmury *cumulonimbus* aż do powierzchni ziemi (Edwards i inni, 2004) w polskiej nomenklaturze nazywane jest „trąbą powietrzną”. Zjawisko to było notowane praktycznie na każdym kontynencie oprócz Antarktydy. Powstaje najczęściej w strefach ścierania się dwóch zróżnicowanych termicznie oraz wilgotnościowo mas powietrza, co jest charakterystyczne dla strefy umiarkowanej. Największe nasilenie tego zjawiska pod względem ilościowym oraz jakościowym występuje w rejonie Wielkich Równin Stanów Zjednoczonych, gdzie wilgotne i ciepłe masy powietrza znad Zatoki Meksykańskiej spotykają się z chłodniejszymi i bardziej suchymi masami powietrza znad Gór

Skalistych (Concannon i inni, 2000). Z danych National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) wynika, że w stanach takich jak Kansas czy Teksas zjawisko jest dosyć powszechne (ponad 100 rocznie) i istotnie zagraża życiu ludzi. Jego siłę określa się w skali zniszczeń, jakie powoduje wiatr o określonej prędkości. Najczęściej używa się skali Fujity (Fujita, 1971) oraz TORRO (Meaden i inni, 2007). W Polsce funkcjonuje również 3-stopniowa skala dostosowana do polskich warunków, zaproponowana przez H. Lorenc (2012). W Polsce tornada osiągają największą aktywność w okresie od maja do sierpnia, w godzinach 16.00–20.00 (Taszarek, 2012). Według H. Lorenc (2012) największe prawdopodobieństwo ich wystąpienia notuje się w sierpniu (7%) oraz lipcu (5%). Średnia wieloletnia – to około 4 incydenty rocznie, jednak w ostatnich latach notuje się wzrost nawet do 10–12 przypadków rocznie (Lorenc, 2012; Taszarek, 2012). Najwięcej zjawisk trąby powietrznej pojawia się w pasie od Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej aż po Podlasie, obszar ten nazywany jest „szlakiem przemieszczania się trąb powietrznych w Polsce” (Lorenc, 2012) bądź też „polską aleją trąb powietrznych” (Taszarek, 2012). Amerykanie od wielu lat badają mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie trąb powietrznych (Davies-Jones i inni, 2001) i rozwijają systemy ich wczesnego wykrywania oraz ostrzegania (Stensrud i Gao, 2010). W Polsce nie posiadamy jeszcze takich systemów, gdyż trąby powietrzne występują rzadko i zazwyczaj nie generują tak dużego zagrożenia jak w Stanach Zjednoczonych. Dramatyczne przypadki z ostatnich lat: 20.07.2007 (Bebłot i inni, 2008; Parfiniewicz, 2009), 15.08.2008 (Lorenc i inni, 2008; Beblot i inni, 2010) oraz 14.07.2012 r., kiedy wystąpiły trąby powietrzne o sile F3 w skali Fujity i spowodowały śmierć ludzi wskazują jednak, że warto rozważyć, jakie są w Polsce obecne możliwości prognozowania i ostrzegania przed tym zjawiskiem. Celem artykułu nie była ocena i weryfikacja ilościowa dotychczas stosowanych procedur i prognoz trąb powietrznych, ale przegląd stosowanych metod i instytucji, które takie prognozy wykonują. Kwestia prognozowania trąb powietrznych wbrew powszechnej opinii jest w Polsce nowa i dotychczas Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej nie posiadał odpowiednich systemów ani procedur do wydawania ostrzeżeń o trąbie powietrznej, trudno więc dokonać oceny wykonanych prognoz.

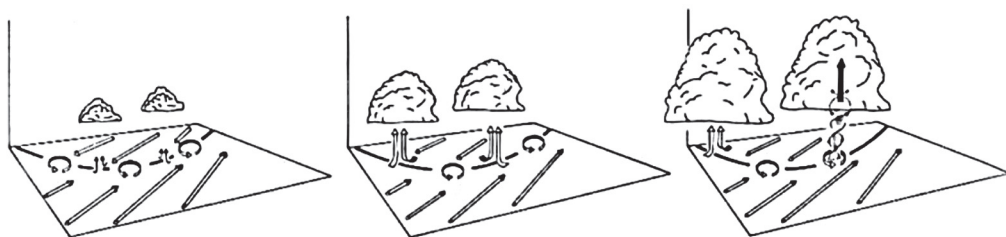
Mechanizm powstawania

Podstawą wszelkich prognoz jest znajomość procesów fizycznych jakie odpowiadają za powstawanie danego zjawiska. Dotychczas nie poznano wszystkich elementów tornadogenezy, ale aktualna wiedza pozwala na wyjaśnienie wielu aspektów powstawania trąb powietrznych. Prekursorami badań nad mechanizmem ich powstawania byli Amerykanie, którzy mieli szerokie możliwości obserwowania tych zjawisk. Obecna teoria mówi, że do powstania trąby powietrznej potrzebne jest wystąpienie pionowej wirowości powietrza, która po rozciągnięciu

może uzyskać rozmiar trąby powietrznej (Markowski i Richardson, 2009). Taka wirowość może mieć różną genezę. J.M. Davies-Jones i inni (2001) wyróżnili dwa podstawowe mechanizmy.

Trąby powietrzne niezwiązane z mezocyklonem

Pierwszy jest związany z obecnością pionowej wirowości powietrza w rejonach horyzontalnego uskoku wiatru, czyli strefach, gdzie wiatr w płaszczyźnie poziomej nagle zmienia kierunek (Wakimoto i Wilson, 1989; Wilczak i inni, 1992). Takimi strefami mogą być granice frontu chłodnego, strefy konwencji, linie szkwałowe (Carbone, 1982; Lorenc, 2012), bądź też lokalne turbulencje związane z ruchami w obrębie chmury konwekcyjnej. Horyzontalne uskoki wiatru w takich strefach powodują występowanie pionowych rotorów powietrza o różnej skali, od małych – przy lokalnej turbulencji do dużych – w przypadku frontu chłodnego. Ich wirowość jest zazwyczaj cyklonalna i cechuje ją nietrwałość. Sytuacja ulega zmianie, kiedy nad rotorem pojawia się chmura z silnymi ruchami wnoszącymi (ryc. 1). Powoduje to rozciąganie rotora w pionie, co wiąże się ze zmniejszaniem jego średnicy, zwiększaniem prędkości kątovej i wreszcie obniżeniem ciśnienia w centrum (Markowski i Richardson, 2009). Przy sprzyjających warunkach wir może osiągnąć wielkość trąby powietrznej i rozciągać się pomiędzy poziomem kondensacji a powierzchnią ziemi. Trąby powietrzne



Ryc. 1. Schemat powstawania trąb powietrznych niezwiązanych z mezocyklonem w strefach konwencji

The formation of a non-mesocyclonic tornado along a convergence line

Źródło / Source: Wakimoto i/and Wilson (1989).

powstałe w ten sposób nazywane są trąbami lądowymi lub wodnymi (ang. *landspout*, *waterspout*; Bluestein, 1985) i mogą uzyskać prędkość w leju do około 200 km h^{-1} osiągając zazwyczaj siłę F1. Trwają od kilkunastu sekund do kilku-kilkunastu minut. Występują najbardziej powszechnie, ale ze względu na małe rozmiary oraz częste „wtopienie” w struktury frontowe, są jednocześnie bardzo trudne do wykrycia w systemach radarowych (Lorenc, 2012). Ze względu na krótki cykl życia oraz powodowanie umiarkowanych zniszczeń, ich detekcja ma

operacyjnie małe znaczenie (fakt, że w momencie wykrycia najczęściej już nie istnieją, ogranicza podejmowanie jakichkolwiek działań).

Superkomórkowe trąby powietrzne

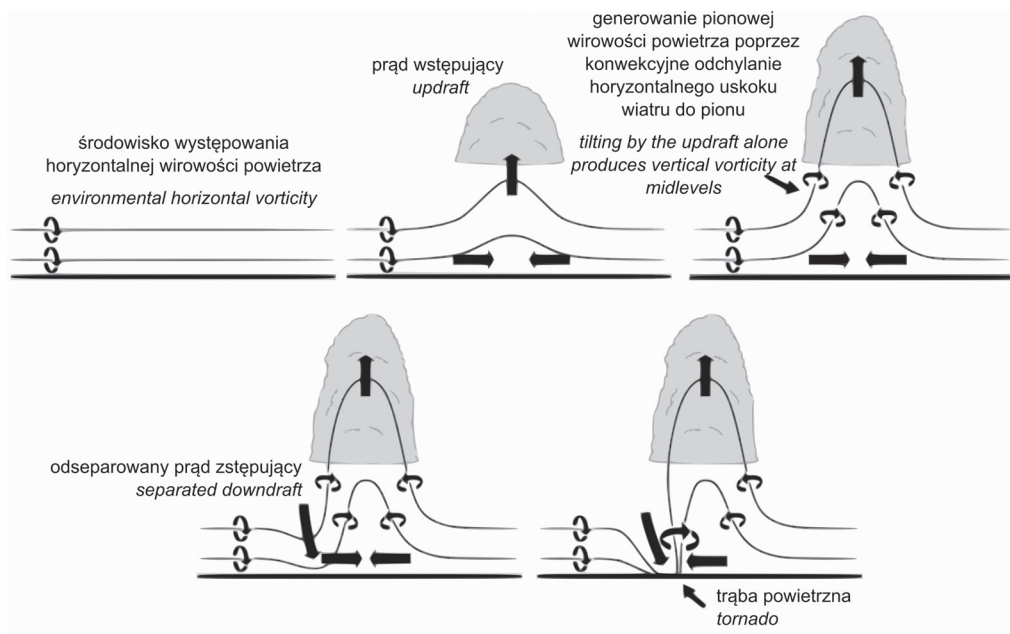
Drugi mechanizm powstawania trąb powietrznych związany jest z obecnością mezocyklonu – wirującej w osi pionowej rozbudowanej chmury *cumulonimbus* zwanej superkomórką (Browning, 1964). Superkomórki występują w środowisku podwyższonych pionowych uskokuw prędkościowych oraz kierunkowych wiatru, które warunkują powstawanie rotorów wirujących w osi poziomej. Przy obecności silnej konwekcji, rotory te odchylane są w kierunku pionowym i powodują wirowanie całego układu (Lorenc, 2012). Istnienie mezocyklonu związane jest również z odseparowaniem prądów wstępujących i zstępujących. Zapewnia to chmurze burzowej stały dostęp do energii w postaci ciepłego i wilgotnego powietrza, gdyż jego napływ nie jest ograniczany prądami zstępującymi. Ze względu na znaczne prędkości w wyższych partiach atmosfery (obecność prądu strumieniowego), rdzeń konwekcyjny mezocyklonu zazwyczaj pochylony jest zgodnie z kierunkiem wiatru z wyższych partii troposfery. Zagrożenie zejściem trąby powietrznej występuje wtedy, kiedy odseparowany prąd zstępujący w tylnej części chmury „odetnie” główny rdzeń mezocyklonu od poziomego rotoru przy powierzchni ziemi (ryc. 2).

Przy znacznie obniżonym poziomie kondensacji i obecności chmury stropowej, wir po osiągnięciu powierzchni ziemi obniża ciśnienie w swoim centrum i staje się trąbą powietrzną. Superkomórki są odpowiedzialne za zdecydowaną większość silnych i niszczycielskich trąb powietrznych (Doswell i Burgess, 1993). W Polsce tornada związane z superkomórkami mogą osiągać siłę nawet do F4 w skali Fujity (Gumiński, 1936). Występują jednak w środowisku o bardzo charakterystycznych warunkach kinematycznych i termodynamicznych, które w skali synoptycznej można przewidzieć. W systemach radarowych dają zazwyczaj charakterystyczne odbicie, co znacznie zwiększa szanse na ich detekcję. Ich cykl życia w warunkach polskich może trwać nawet do godziny (przypadek z 14.07.2012) – umożliwia to podjęcie działań w celu ostrzeżenia mieszkańców znajdujących się na trajektorii takiej superkomórki.

Badania klimatologiczne

Badania klimatologiczne nad trąbami powietrznymi pełnią równie ważną rolę jak badania nad mechanizmami ich powstawania. Szczególnie istotne są opracowania, w których analizuje się parametry fizyczne pochodzące z sondowań atmosferycznych. Niektóre prace analizują również dane pochodzące z numerycznych modeli pogody, porównując je z występowaniem trąb powietrznych. Prekursorami tego typu badań byli Amerykanie (Rasmusen i Blanchard, 1998; Rasmusen, 2003; Thompson i inni, 2004; Craven i Brooks, 2004), którzy

jako pierwsi wyznaczyli parametry charakterystyczne dla środowisk sprzyjających trąbom powietrznym. W Europie podobne badania prowadzili A. Haklander i A. van Delden (2003), P.H. Groenmeijer i A. van Delden (2007), S. Grünwald i H.E. Brooks (2011). W Polsce klimatologiczne analizy występowania trąb powietrznych wykonali S. Walczakiewicz i inni (2011), H. Lorenc (2012) oraz M. Taszarek (2012). Pojedyncze przypadki najsilniejszych trąb powietrznych



Ryc. 2. Schemat powstawania superkomórkowej trąby powietrznej

The formation of a supercell tornado

Źródło / Source: Markowski i/and Richardson (2009).

były analizowane przez H. Lorenc i innych (2008), G. Bełt (2008), J.W. Parfiniewicz (2009) oraz G. Bełt i innych (2010). Wyniki tych badań pozwalają nam nie tylko stwierdzić, kiedy i gdzie najczęściej występują trąby powietrzne, ale również określić parametry termodynamiczne i kinematyczne, które można zastosować w numerycznych modelach pogody jako predyktory. Przykładami wskaźników, które powstały w ten sposób i są dedykowane prognozowaniu trąb powietrznych są: Significant Tornado Parameter (Thompson i inni, 2002), Non-supercell Tornado Parameter (Baumgardt i Cook, 2006), Szilagyí Waterspout Index (Keul i inni, 2009), Energy Helicity Index (Davies, 1993) czy też Universal Tornado Index (Taszarek i Kolendowicz, 2013).

Możliwości prognozowania i ostrzegania

Obecna infrastruktura techniczna oraz wiedza dotycząca trąb powietrznych, pozwala wyróżnić trzy metody, które wykorzystuje się przy prognozowaniu tych zjawisk.

Numeryczne modele pogody

Pierwszą, najbardziej prężnie rozwijaną, jest analiza numerycznych modeli pogody, które są symulatorem procesów fizycznych zachodzących w atmosferze. Wykorzystuje się w nich dynamikę ruchu cząsteczki oraz procesy termodynamiczne jakim podlega. Dzięki numerycznym modelom pogody możemy uzyskiwać informacje dotyczące stanu atmosfery w najbliższych kilkudziesięciu godzinach. Modele takie działają w różnych skalach przestrzennych: mikroskali, mezoskali oraz skali synoptycznej.

Mikroskala

Trąba powietrzna jest zjawiskiem lokalnym, często o średnicy kilkudziesięciu metrów, dlatego do jej analizy powinno się używać dokładnych modeli z rozmiarem siatki kilkunastu metrów. Niestety ruch cząstek w takiej skali jest niezwykle trudno opisać, gdyż wymaga uwzględnienia ogromnej ilości detali, konieczne są więc specyficzne metody i uproszczenia. Sprawiają one, że uzyskane wyniki w skali kraju nie są na tyle wiarygodne, aby skutecznie prognozować trąby powietrzne. Obecnie nie ma na świecie modeli mikroskalowych, które obejmowałyby tak duże obszary i były wykorzystywane operacyjnie.

Mezoskala

Znacznie lepsze wyniki osiąga się przy użyciu modeli globalnych oraz mezoskalowych. Zastosowanie tutaj znajdują głównie parametry kinematyczne oraz termodynamiczne, w tym wskaźniki kompozytowe, które określają jak bardzo środowisko sprzyja formowaniu trąb powietrznych. Do prognozowania trąb mezocyklonicznych (superkomórkowych) wykorzystuje się takie parametry jak CAPE (*convective available potential energy*), DLS (*deep layer shear*), LLS (*low-level shear*), czy też 0–1 km SRH (*storm relative helicity*, Miller, 1967; Droegemeier i inni, 1993; Craven i Brooks, 2004; Groenmeijer i van Delden, 2007; Taszarek, 2012). Natura trąb niezwiązanych z mezocyklonem jest bardziej skomplikowana i trudniejsza do określenia. Możemy jednak przyjąć, że ich formowaniu sprzyjają podwyższone parametry 0–3 km CAPE oraz pionowy gradient temperatury w dolnym kilometrze troposfery (Groenmeijer i van Delden, 2007; Taszarek, 2012). W obu przypadkach regułą jest również występowanie obniżonych poziomów kondensacji (LCL – *lifted condensation level*) i poziomu

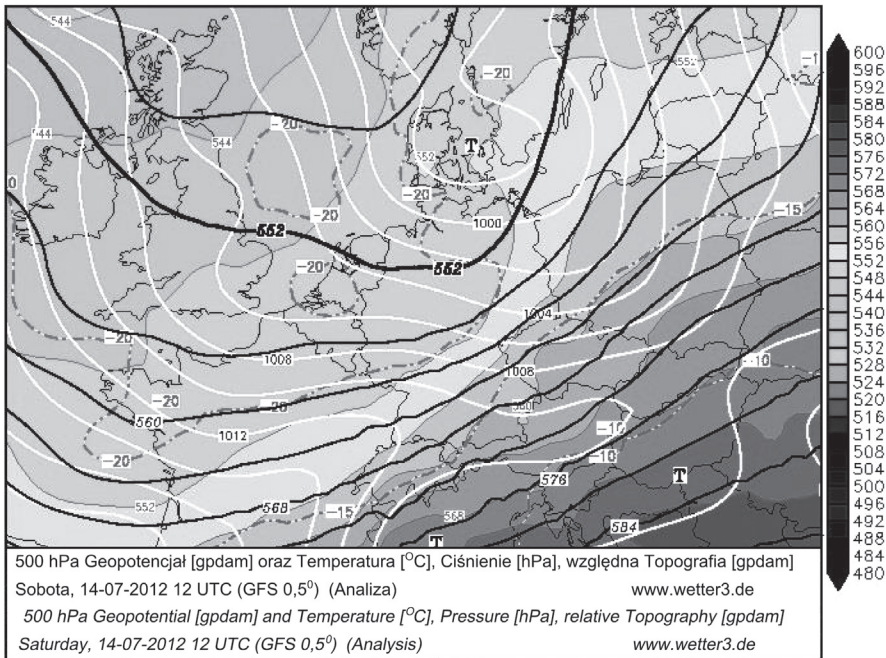
swobodnej konwekcji (LFC – *level of free convection*) (Craven i Brooks, 2004; Groenmeijer i van Delden, 2007; Taszarek, 2012) oraz niskich deficytów punktu rosy (Walczakiewicz i inni, 2011; Taszarek, 2012). Umiarkowaną skuteczność prognozowania trąb powietrznych w mezoskali wykazują wskaźniki kompozytowe opracowane na bazie klimatologii trąb powietrznych dla Stanów Zjednoczonych: Significant Tornado Parameter (Thompson i inni, 2002) oraz dla Polski: Universal Tornado Index (Taszarek i Kolendowicz, 2013). Obecnie prognozowanie przy użyciu modeli mezoskalowych jest najbardziej powszechną metodą oceny środowiska pod kątem potencjału do generowania trąb powietrznych.

Skala synoptyczna

W prognozowaniu trąb powietrznych modele globalne pozwalają w skali synoptycznej określać obszary narażone na występowanie chwiejności termodynamicznej, uskoków wiatru oraz prądu strumieniowego. Sytuacja taka występuje wtedy, gdy mamy do czynienia z krótką falą baryczną w dolnej troposferze oraz rozległą (wraz z prądem strumieniowym) w górnej troposferze (Walczakiewicz i inni, 2011) (ryc. 3). Trąby powietrzne powstają zazwyczaj na południowy wschód od wierzchołka takiej fali. Powietrze w górnych warstwach troposfery w takiej strefie ulega dywergencji i warunkuje pojawianie się głębokiej konwekcji (Doswell, 2001). Jeżeli w takich strefach pojawiają się również silne pionowe uskoki kierunkowe oraz prędkościowe wiatru, mogą wytworzyć się struktury superkomórkowe. Podobna sytuacja wystąpiła w dniu 14 lipca 2012 r., kiedy na południowy wschód od centrum niskiego ciśnienia nad Danią wystąpiła chwiejność termodynamiczna, a nad Polską przechodził front chłodny. Obecność prądu strumieniowego oraz silnych uskoków wiatru spowodowała wystąpienie superkomórki oraz związanej z nią trąby powietrznej, która pojawiła się w rejonie Borów Tucholskich. Według Lorenc (2012) oraz Walczakiewicz i innych (2011) występowanie frontu pofalowanego oraz chłodnego poprzedzonego kilkudniową słoneczną pogodą z rozmytym polem barycznym sprzyja powstaniu trąb powietrznych. Prognozowanie w skali synoptycznej jest niestety w dużym stopniu zgeneralizowane i nie oferuje takiej dokładności jak modele mezoskalowe.

Nowcasting

Nowcasting, czyli prognozowanie pogody „na teraz”, polega na wykorzystaniu aktualnych danych teledetekcyjnych (zdjęcia satelitarne, zobrazowania radarowe), depesz meteorologicznych oraz informacji pochodzących od lokalnych obserwatorów burz. Aktualne zdjęcia z satelity geostacjonarnego dają możliwość określenia obszarów inicjacji konwekcji, wierzchołków chmur *cb* oraz wyznaczenia ich trajektorii. W prognozowaniu trąb powietrznych najbardziej użyteczne są radary dopplerowskie, dające możliwość wykrycia lokalnej wirowości powietrza w postaci mezocyklonu (Doswell i Burgess, 1993). Szczególnie istotna jest



Ryc. 3. Sytuacja baryczna nad Europą Środkową w dniu 14.07.2012 dla godziny 12.00 UTC wyliczona przez numeryczny model globalny GFS. Krótka fala w dolnej troposferze, białe linie – ciśnienie zredukowane do poziomu morza oraz rozległa fala w górnej troposferze, czarne linie – geopotencjał 500 hPa (archiwum wetter3.de)

The synoptic situation over Central Europe on July 14th 2012 for 12.00 UTC, as calculated using the GFS global numerical weather model. Mean sea-level pressure denoting short wave is marked using white lines, while 500 hPa geopotential height denoting the long wave is marked using black lines (wetter3.de archive)

identyfikacja sygnatury „hook-echo” (Stout i Huff, 1953), która według obserwacji amerykańskich w 84% przypadków związana jest z wystąpieniem trąby powietrznej (Forbes, 1981). Prognozowanie tą metodą w dużym stopniu zależy od wiedzy synoptyka i systemów jakimi dysponuje. Umożliwia wydawanie prognoz i ostrzeżeń o większej szczegółowości, gdyż uwzględnia czynniki lokalne i aktualne dane o pogodzie. Pomimo zawansowanych modeli numerycznych, nowcasting jest obecnie najlepszą metodą krótkoterminowego prognozowania i ostrzegania przed niebezpiecznymi zjawiskami konwekcyjnymi. Przy użyciu odpowiedniej technologii radarowej służącej wykrywaniu mezocyklonów, możliwe jest ustalenie określonej trajektorii komórki burzowej i zawiadomienie ludności na kilkanaście do kilkudziesięciu minut przed pojawieniem się zagrożenia. Należy jednak pamiętać, że dane z systemu radarowego są dostępne z około 10-minutowym opóźnieniem (wynika to z pomiaru i przetworzenia danych jakie musi radar wykonać), co istotnie skraca czas na reakcję, a w niektórych

przypadkach uniemożliwia podjęcie działania. Amerykanie w celu wydłużenia czasu reakcji stosują system *warn-on forecast*, w którym zobrazowanie radarowe superkomórek jest diagnozowane i prognozowane przy użyciu numerycznego modelu (Yussouf i Stensrud, 2010; Stensrud i Gao, 2010; Stensrud i inni, 2009).

Sondowania atmosferyczne

Sondowania atmosferyczne związane z trąbami powietrznymi są wykorzystywane w badaniach do analizy warunków w jakich owe zjawiska powstają (Groenemeijer i van Delden, 2007; Walczakiewicz i inni, 2011; Taszarek, 2012). Można je więc wykorzystywać również do analizowania aktualnych warunków i estymacji ryzyka pojawienia się trąby powietrznej w danym regionie. Prognozowanie przy użyciu sondowań atmosferycznych opiera się na określeniu parametrów termodynamicznych i kinematycznych dla charakterystycznej masy powietrza oraz ustaleniu kierunku i siły wiatru na poziomie przenoszenia (700 hpa – zima, 500 hpa – lato). W ten sposób możliwe jest ustalenie, dokąd w określonym czasie przemieści się dana masa powietrza. Oczywiście okres ten nie może być długi, gdyż zależnie od warunków lokalnych i pory dnia, parametry fizyczne powietrza zmieniają się i po pewnym czasie dane pomiarowe przestają być reprezentatywne. Sondowania w Polsce w okresie największej aktywności trąb powietrznych (od maja do sierpnia) wykonywane są o godzinie 14.00 czasu lokalnego – w zestawieniu z największą aktywnością trąb powietrznych w ciągu dnia (od 16.00 do 18.00) daje to możliwości wykorzystania ich w metodzie nowcasting. W estymacji warunków sprzyjających powstawaniu trąb powietrznych wykorzystuje się te same parametry, które zostały opisane wcześniej. Użycie ich w radiosondażach może być bardziej wartościowe niż w modelach mezoskalowych, gdyż pokazują parametry zmierzone, a nie modelowe. Ich wadą jest jednak mała szczegółowość prognoz ze względu na nierównomierne i bardzo rzadkie rozmieszczenie stacji pomiarowych. Przykład sondowań z 12.00 UTC z miejscowości Poprad oraz Wiedeń z dnia 15.08.2008 (seria trąb powietrznych w środkowej Polsce – wysokie wskaźniki tornadowe) pokazuje, że dane radiosondażowe są ważnym źródłem informacji dla synoptyka i stanowią wartościowe uzupełnienie danych modelowych, które można wykorzystać w prognozie.

Prognozowanie w Polsce

Najbardziej efektywne prognozy powstają wtedy, gdy łączy się wszystkie opisane metody. Synoptycy powinni opierać się nie tylko na danych modelowych lub radarowych, ale kompleksowo analizować problem. Niezależnie od stopnia rozwinięcia modelowania matematycznego najważniejszy jest więc czynnik ludzki – osoba, która dzięki swojej wiedzy i intuicji będzie w stanie zebrać wszystkie dostępne dane oraz opracować ostateczną prognozę, a w razie zagrożenia wydać ostrzeżenie.

IMGW

W Polsce tymi zagadnieniami zajmuje się Państwowy Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW). Ma on dostęp do specjalistycznej infrastruktury, która pomaga śledzić oraz wykrywać procesy konwekcyjne. W skład systemów teledetekcji naziemnej wchodzi systemy PERUN oraz POLRAD. System PERUN składa się z dziewięciu sensorów SAFIR3000 przeznaczonych do wykrywania elektrycznej składowej fali elektromagnetycznej, a tym samym do detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych doziemnych oraz chmurowych. System POLRAD składa się z 8 radarów Dopplerskich, których zadaniem jest lokalizacja zawieszonych w atmosferze hydrometeorów oraz rozpoznanie i analiza zachodzących w nich zjawisk. Sygnał radarowy może posłużyć do opracowania rozmaitych produktów dających możliwość wykrywania oraz prognozowania groźnych zjawisk konwekcyjnych. Do wykrywania komórek sprzyjających powstawaniu trąb powietrznych można wykorzystać pola rozkładu prędkości radialnych (pozwalające wykryć mezocyklon) oraz odbiciowość niższych elewacji umożliwiając wykrycie struktury hook-echo. Możliwa jest analiza danych zarówno wzdłuż określonej elewacji (PPI) jak i z określonej wysokości (CAPPI). Dodatkowo dostępne są produkty kompozytowe, takie jak SWI (*Severe Weather Indicator*) czy też TVD (*Tornado Vortex Detection*). Trzeba się również zgodzić z wypowiedzią Zdzisława Dzięwita (Tuszyńska, 2012), że „efektywne rozpoznanie trąb powietrznych możliwe jest w odległości do 40–50 km od radaru, w większej odległości skazani jesteśmy na wnioskowanie na podstawie zjawisk towarzyszących i skazani na dużą ilość fałszywych alarmów”. IMGW ma również dostęp do dokładnego modelu mezoskalowego COSMO (siatka 2,8 km), w którym możliwe jest wykorzystywanie rozmaitych parametrów termodynamicznych oraz kinematycznych w prognozach krótko- i średnioterminowych do prognozowania podatności środowiska na generowanie trąb powietrznych. Wskazane przez model mezoskalowy regiony zagrożone zejściem trąby powietrznej implikują dokładniejszą analizę radarową komórek burzowych przechodzących przez te obszary. Ostrzeżenia o groźnych zjawiskach meteorologicznych w 3-stopniowej skali wydaje CBPM (centralne biuro prognoz meteorologicznych) do 24 h przed ich pojawieniem się. W przypadku spodziewanych trąb powietrznych IMGW wydaje okazjonalnie oświadczenia o spodziewanym zjawisku na dzień przed nim. Ponadto ostrzeżenia oraz prognozy przekazywane są do Centrów Zarządzania Kryzysowego oraz instytucji odpowiedzialnych za podjęcie działań związanych ze spodziewanym zagrożeniem. W Warszawie w okresie wiosennym i letnim, pracuje dodatkowo grupa burzowych specjalistów, których celem jest monitoring i diagnoza procesów konwekcyjnych na terenie Polski.

ESTOFEX

Prognozy z uwzględnieniem możliwości pojawienia się trąby powietrznej na obszarze Polski wydaje grupa ESTOFEX (European Storm Forecast Experiment). Ogranicza się do prognoz 24-godzinnych, w których wyznacza zagrożone obszary na obszarze Europy oraz opisuje spodziewane zjawiska konwekcyjne (grad, wyładowania atmosferyczne, trąby powietrzne, silne podmuchy wiatru) w 3-stopniowej skali zagrożenia. Prognozy oparte są głównie na rozmaitych parametrach termodynamicznych i kinematycznych obliczanych przez numeryczne modele globalne, analizowane przez pracujących tam synoptyków. Produkty ESTOFEXU cechuje wysoki poziom sprawdzalności, jednak ze względu na brak użycia metod nowcastingowych, zespół nie wykrywa bezpośredniego zagrożenia, a raczej wskazuje na obszar, gdzie takowe może wystąpić.

Skywarn Polska

Zarówno nowcastingiem, jak i prognozami mezoskalowymi, zajmuje się europejskie stowarzyszenie Skywarn z polskim oddziałem „Polscy Łowcy Burz”. Instytucja ta wykorzystuje ogólnodostępne dane pochodzące z numerycznych modeli globalnych i mezoskalowych oraz dane teledetekcyjne. Podobnie jak ESTOFEX, Skywarn Polska wykonuje mezoskalowe prognozy 24-godzinne z 3-stopniową skalą zagrożenia zjawiskami konwekcyjnymi (grad, wyładowania atmosferyczne, trąby powietrzne, silne podmuchy wiatru) oraz prowadzi na bieżąco nowcasting, wydając ostrzeżenia dla poszczególnych powiatów. Okresowo Skywarn Polska wydaje również średnioterminowe prognozy konwekcyjne, gdzie uwzględnia możliwość pojawiania się trąb powietrznych. Polscy łowcy burz mają także dostęp do szerokiego grona obserwatorów-pasjonatów, którzy monitorują sytuację w poszczególnych regionach kraju oraz zapewniają dokumentację zjawisk atmosferycznych. Nie posiadają niestety dostępu do zaawansowanych produktów radarowych oraz zintegrowanego i zaawansowanego systemu ostrzegania, który pozwalałby szybko zawiadamiać odpowiednie instytucje państwowe oraz mieszkańców znajdujących się na trasie niebezpiecznych komórek burzowych.

Poziomy prognozowania

Analiza obecnej wiedzy na temat tornadogenezy, dostępu do danych o pogodzie oraz możliwości krajowego prognozowania, pozwoliła wyznaczyć 4 poziomy, na których może odbywać się prognozowanie trąb powietrznych (tab. 1).

Poziom pierwszy funkcjonuje głównie w skali synoptycznej i wykorzystuje modele globalne. Daje możliwości wskazania rozległych obszarów, w których mogą wystąpić niebezpieczne zjawiska konwekcyjne, do 48 godzin przed ich pojawieniem się. Ze względu na skomplikowane procesy fizyczne jakim podlega

Tabela 1. Poziomy prognozowanie trąb powietrznych w Polsce
Tornado forecasting levels in Poland

Poziom <i>Level</i>	Okres prognozy / ostrzeżenia <i>Time of forecast / warning</i>	Produkt użyty <i>Used product</i>	Elementy prognozy / ostrzeżenia <i>Forecast / warning ingredients</i>	Szansa na przewidzenie <i>Chance for prediction</i>	Możliwość ostrzeżenia <i>Warning- possibili- ties</i>	Szczegó- łość pro- gnozy <i>Forecast- details</i>
1	48 h–24 h	model globalny <i>global model</i>	określanie środowiska sprzyjającego powstawaniu trąb powietrznych przy użyciu parametrów termodynamicznych i kinematycznych <i>defining an environment conducive to the formation of tornadoes by using thermodynamic and kinematic parameters</i>	niska <i>low</i>	wysoka <i>high</i>	niska <i>low</i>
2	24 h–3 h	model globalny oraz mezoskalowy i sondowania atmosferyczne <i>global or mesoscale model and atmospheric soundings</i>	określanie środowiska sprzyjającego powstawaniu trąb powietrznych przy użyciu parametrów termodynamicznych i kinematycznych <i>defining an environment conducive to the formation of tornadoes by using thermodynamic parameters and kinematic</i>	niska <i>low</i>	umiarkowana <i>moderate</i>	umiarkowana <i>moderate</i>
3	3 h–30 min	zobrazowanie radarowe <i>radar data</i>	określanie trajektorii i monitoring komórek burzowych w strefach zagrożenia wyznaczonych przez model mezoskalowy <i>determining and monitoring the trajectory of convective cells invulnerable zones pointed by the mesoscale model</i>	umiarkowana <i>moderate</i>	niska <i>low</i>	wysoka <i>high</i>
4	30 min–0 min	zobrazowanie radarowe <i>radar data</i>	skręcające komórki burzowe z sygnaturami <i>hook-echo</i> , <i>v-notch</i> , detekcja mezocyklonu i zjawisk towarzyszących na produktach radarowych, symulacje radarowe <i>torsional convective cells with hook-echo and v-notch signatures, detection of mesocyclone and accompanying conditions on the radar products, radar simulations</i>	wysoka <i>high</i>	bardzo niska <i>very low</i>	bardzo wysoka <i>very high</i>
–	0 min	widoczny lej kondensacyjny <i>visible tornado</i>	informacja od świadków zdarzenia <i>information from the witnesses of the event</i>	–	–	–

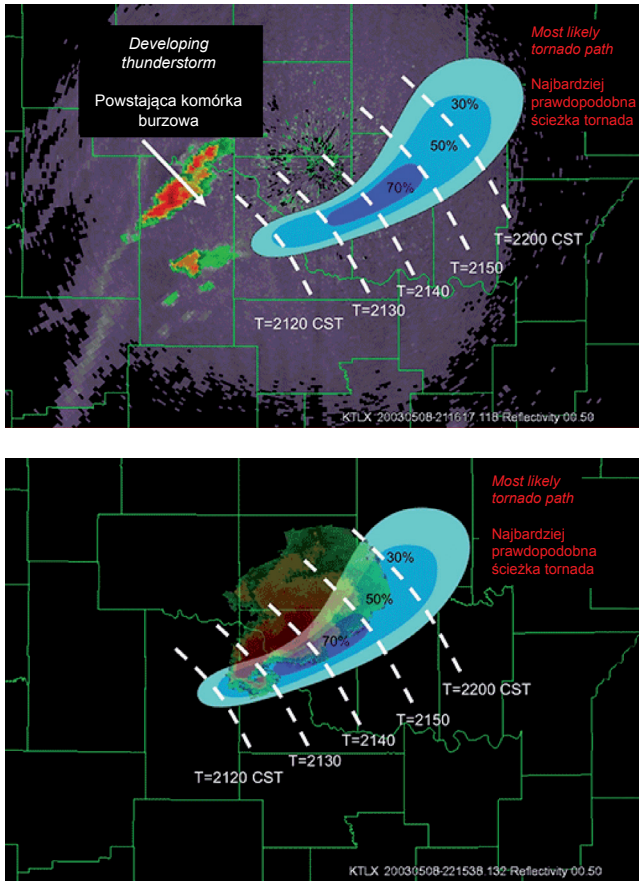
Opracowanie własne. / Author's own elaboration.

troposfera, niezwykle trudno jest dokładnie przewidzieć pogodę z 48-godzinnym wyprzedzeniem, dlatego sprawdzalność prognoz jest relatywnie niska.

W następnym poziomie oprócz modeli globalnych korzysta się z dokładniejszych modeli mezoskalowych, które w interwale czasowym do 24 godzin oferują bardziej szczegółowe i wiarygodne dane; wzrasta wtedy dokładność i sprawdzalność prognoz. Tutaj możliwe jest jeszcze efektywne poinformowanie mieszkańców poprzez formułowane w mediach ostrzeżenia o potencjalnie niebezpiecznych zjawiskach. Właśnie na tym poziomie przede wszystkim funkcjonuje obecne prognozowanie w Polsce (ESTOFEX, IMGW, Skywarn Polska).

Trzeci poziom opiera się na monitorowaniu powstałych komórek burzowych i nowcastingu, w którym dokładność i rzetelność prognoz oraz ostrzeżeń wzrasta. Taki monitoring prowadzi stowarzyszenie Skywarn Polska, które wykorzystując ogólnodostępne dane wydaje ostrzeżenia dla powiatów. Niestety, ze względu na brak rozwiniętych systemów informowania mieszkańców, niewielkie są możliwości dotarcia z ostrzeżeniem do osób znajdujących się na trajektorii niebezpiecznych komórek burzowych. IMGW przy użyciu własnych systemów teledetekcyjnych również prowadzi nowcasting. Grupa burzowych specjalistów w Warszawie monitoruje na bieżąco zjawiska konwekcyjne, a synoptycy w regionalnych biurach prognoz meteorologicznych wydają ostrzeżenia o możliwości wystąpienia niebezpiecznych zjawisk.

Ostatni, 4 poziom, wymaga dostępu do zaawansowanego systemu radarowego i umożliwia wydawanie ostrzeżeń z wysokim prawdopodobieństwem detekcji (84% w przypadku *hook-echo*, Forbes, 1981). Taki dostęp posiada IMGW, jednak nie dysponuje odpowiednim systemem ostrzegania mieszkańców w tak krótkim czasie. Na tym poziomie doskonale radzą sobie specjaliści ze Stanów Zjednoczonych, którzy po wielu latach doświadczeń związanych z tornadami, rozwinęli specjalne systemy prognozowania zobrazowania radarowego (ryc. 4), które potrafią wydłużyć czas na reakcje nawet do 20 minut (Yussouf i Stensrud, 2010; Stensrud i inni, 2009; Stensrud i Gao, 2010). Dzięki temu uzyskuje się dodatkowy czas na poinformowanie mieszkańców systemami ostrzegania (komunikaty w TV, radio, telefony komórkowe, syreny alarmowe). Mieszkańcy są informowani, jak reagować na ostrzeżenia oraz kiedy najczęściej można się ich spodziewać. Dodatkowo NOAA NWS przeprowadza specjalistyczne szkolenia dla obserwatorów burz, którzy w przypadku zaobserwowania niebezpiecznego zjawiska konwekcyjnego informują o tym służby meteorologiczne – w wielu przypadkach skraca to czas konieczny na wydanie odpowiednich ostrzeżeń.



Ryc. 4. Prognoza prawdopodobieństwa trąby powietrznej wykonana za pomocą systemu „warn-on-forecast” NOAA NWS

A tornado probability forecast generated by the "warn-on forecast" system of the NOAA NWS

Źródło / Source: www.nssl.noaa.gov

Podsumowanie

Aktualne badania pozwalają wyróżnić dwa mechanizmy powstawania, które generują dwa typy trąb powietrznych: trudniejsze do przewidzenia, ale słabsze trąby powietrzne niezwiązane z mezocyklonem oraz znacznie silniejsze i łatwiejsze do przewidzenia trąby powietrzne związane z występowaniem mezocyklonu w postaci superkomórki. Współczesne badania klimatologiczne wykazują, że trąby powietrzne w Polsce występują najczęściej w okresie od maja do sierpnia w godzinach od 16.00 do 20.00 i mogą generować zjawiska o sile do F3/F4 w skali Fujity. Obecne możliwości pozwalają na prognozowanie środowisk sprzyjających

generowaniu trąb powietrznych przy użyciu zarówno numerycznych modeli globalnych i mezoskalowych, jak i aktualnych sondowań atmosferycznych z wykorzystaniem parametrów termodynamicznych oraz kinematycznych. Funkcjonujące w Polsce systemy PERUN oraz POLRAD pozwalają na prowadzenie nowcastingu i umożliwiają identyfikację mezocyklonu oraz struktury *hook-echo* potencjalnie związanej z trąbą powietrzną. Prognozowaniem trąb powietrznych dla obszaru Polski zajmuje się IMGW oraz Skywarn Polska, wykonując prognozy mezoskalowe oraz prowadząc nowcasting. Europejska organizacja ESTOFEX wykonuje dodatkowo krótkoterminowe prognozy konwekcyjne obejmując nimi obszar Polski. Trąby powietrzne nie są w Polsce tak powszechne jak w Stanach Zjednoczonych, ale ich rosnąca aktywność powoduje, że wzrasta potencjalne zagrożenie dla ludzkiego życia i należy podjąć odpowiednie kroki, aby rozwinąć metody wczesnego ostrzegania ludności. Zaproponowane poziomy wydawania ostrzeżeń przed trąbą powietrzną mają na celu usystematyzowanie działań jakie się podejmuje w prognozowaniu tego zjawiska. Obecnie w Polsce ostrzeganie przed zjawiskiem trąby powietrznej funkcjonuje na poziomach drugim i trzecim, ale dokładność i sprawdzalność prognoz na tym etapie jest stosunkowo niska. IMGW posiada odpowiednią infrastrukturę radarową do monitorowania echa związanego z superkomórką na poziomie czwartym. Obecnie czas na reakcję jest jednak zbyt krótki, aby informacja dotarła do mieszkańców na czas, nie funkcjonują systemy, które mogłyby szybko rozesłać informacje o zagrożeniu do znacznego grona odbiorców. Pilna jest więc potrzeba wprowadzenia odpowiednich systemów ostrzegania (np. przy użyciu telefonów komórkowych) oraz rozwój numerycznej prognozy zobrazowania radarowego w celu wydłużenia czasu na wydanie ostrzeżenia. Nie bez znaczenia jest również uświadamianie mieszkańców, jak odpowiednio interpretować ostrzeżenia i jak się zachowywać w sytuacji niebezpieczeństwa. Trzeba także pamiętać, że ze względu na małą skalę zjawiska i bardzo dynamiczny przebieg, nie jest tymczasem możliwe przewidzenie z dużym wyprzedzeniem, kiedy i gdzie pojawi się trąba powietrzna. Zjawisko o rozpiętości kilkudziesięciu metrów nie jest wychwytywane przez mezoskalowe modele pogody, w których gęstość siatki wynosi kilka kilometrów. Obecne prognozowanie opiera się głównie na określaniu warunków sprzyjających powstawaniu takiego zjawiska i probabilistycznemu oszacowaniu zagrożenia.

Piśmiennictwo / References

- Baumgardt D.A., Cook K., 2006, *Preliminary evaluation of a parameter to forecast environments conducive to non-mesocyclone tornadogenesis*, [w:] 23rd Conference on Severe Local Storms, St. Louis, paper 12.1
<https://ams.confex.com/ams/23SLS/webprogram/Paper115294.html> (1.09.13)
- Bebłot G., Hołda I., Rorbek K., 2008, *Trąba powietrzna w rejonie Częstochowy 20 lipca 2007 roku*, Ekstrema pogodowe w Polsce, obserwacje, pomiary, prognozy, IMGW, Warszawa.

- Bebłot G., Dubiel G., Konarski J., Tuszyńska I., 2010, *Groźne zjawiska atmosferyczne na terenie Polski w dniu 15 sierpnia 2008 r.*, Ryzyko w problemach zagrożeń środowiska, IMGW, Warszawa.
- Bluestein H.B., 1985, *The formation of a "landspout" in a "broken-line" squall line in Oklahoma*, [w:] *14th Conference on Severe Local Storms, Indianapolis*, American Meteorological Society, s. 267–270.
- Browning K.A., 1964, *Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds*, *Journal of Atmospheric Science*, 22, s. 664–668.
- Brooks H. E., Doswell III C. A., 2001, *Some aspects of the international climatology of tornadoes by damage classification*, *Atmospheric Research*, 56, s. 191–201.
- Concannon P.R., Brooks H.E., Doswell III C. A., 2000, *Climatological risk of strong and violent tornadoes in the United States*, [w:] *Preprints. 2nd Conference on Environmental Applications*, American Meteorological Society, Long Beach, s. 212–219.
- Carbone R.E., 1982, *A severe frontal rainband. Part I: stormwide hydrodynamic structure*. *Journal of Atmospheric Science*, 39, s. 258–279.
- Craven J.P., Brooks H.E., 2004, *Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection*, *National Weather*, 28, s. 13–24.
- Davies J.M., 1993, *Some wind and instability parameter associated with strong and violent tornadoes. Part I: Wind shear and helicity*, [w:] H. Church (red.), *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*, American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 79, s. 573–582.
- Davies-Jones R.P., Trapp R.J., Bluestein H.B., 2001, *Tornadoes and tornadic storms*, [w:] *Severe Convective Storms*, American Meteorological Society Monograph, 28, 50, s. 167–254.
- Doswell III C.A., 2001, *Severe convective storms—an overview*, [w:] *Severe Convective Storms*, American Meteorological Society Monograph, 28, 50, s. 1–26.
- Doswell III C.A., Burgess D.W., 1993, *Tornadoes and tornadic storms: a review of conceptual models*, [w:] H. Church (red.), *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 79, s. 161–172.
- Droegemeier K.K., Lazarus S.M., Davies-Jones R., 1993, *The influence of helicity on numerically simulated convective storms*, *Monthly Weather Review*, 121, 7, s. 2005–2029.
- Edwards R., Thompson R., Crosbie C., Hart J.A., Doswell III C.A., 2004, *Proposals for modernizing definitions of tornado and severe thunderstorm outbreaks*, [w:] *Preprints. 22nd Conference on Severe Local Storms*, American Meteorological Society, Hyannis, MA.
- Forbes G., 1981, *On the reliability of hook echoes as tornado indicators*, *Monthly Weather Review*, 109, 7, s. 1457–1466.
- Fujita T.T., 1971, *Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity*, SMRP Research Paper, 91, University of Chicago.
- Groenemeijer P.H., van Delden A., 2007, *Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands*, *Atmospheric Research*, 83, s. 473–487.
- Grünwald S., Brooks H.E., 2011, *Relationship between sounding derived parameters and the strength of tornadoes in Europe and the USA from reanalysis data*, *Atmospheric Research*, 100, s. 479–488.
- Gumiński R., 1936, *Trąba powietrzna pod Lublinem w dniu 20 lipca 1931 r.*, *Wiadomości Meteorologiczne i Hydrologiczne* 16, s. 7–9.
- Haklander A., van Delden A., 2003, *Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands*, *Atmospheric Research*, 67–68, s. 273–299.
- Keul A.P., Sioutas M.V., Szilagyi W., 2009, *Prognosis of Central-Eastern Mediterranean waterspouts*, *Atmospheric Research*, 93, s. 426–436.

- Lorenc H. i inni, 2008, *Trąby powietrzne i burze w Polsce w dniach 15 i 16 sierpnia 2008 r.*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, www.imgw.pl (10.05.2013).
- Lorenc H., 2012, *Maksymalne prędkości wiatru w Polsce*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Markowski P.M., Richardson Y.P., 2009, *Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research*, Atmospheric Research, 93, s. 3–10.
- Meaden G.T., Kolendowicz L., Kosa-Kiss A., Marcinonien I., Sioutas M., Tooming H., Tyrrell J., 2007, *Comparing the theoretical versions of the Beaufort scale, the T-Scale and the Fujita scale*, Atmospheric Research, 83, s. 446–449.
- Miller R.C., 1967, *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Military Weather Warning Center*, Technical Report, 200, AWS, USAF.
- Parfiniewicz J.W., 2009, *Tornado w rejonie Częstochowy – 20 lipca 2007. Część I: Analiza synoptyczna, Część II: Symulacje komputerowe i analiza 3D*, Przegląd Geofizyczny, 3-4.
- Rasmussen E.N., Blanchard, D.O., 1998, *A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters*, Weather Forecasting, 13, s. 1148–1164.
- Rasmussen E.N., 2003, *Refined supercell and tornado forecast parameters*, Weather Forecasting, 18, s. 530–535.
- Stensrud D.J., Gao J., 2010, *Importance of horizontally inhomogeneous environmental initial conditions to ensemble storm-scale radar data assimilation and very short range forecasts*, Monthly Weather Review, 138, 4, s. 1250–1272.
- Stensrud D.J., Xue M., Wicker L.J., Kelleher K. E., Foster M.P., Schaefer J.T., Schneider R.S., Benjamin S.G., Weygandt S.S., Ferree J.T., Tuell J.P., 2009, *Convective-scale warn on forecast: A vision for 2020*, Bulletin of American Meteorological Society, 90, s. 1487–1499.
- Stout G.E., Huff F.A., 1953, *Radar records Illionis tornadogenesis*, Bulletin of American Meteorological Society, 34, s. 281–284.
- Taszarek M., 2012, *Sounding-derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and Universal Tornadic Index*, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego UAM, Poznań, maszynopis.
- Taszarek M., Kolendowicz L., 2013, *Sounding-derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and Universal Tornadic Index*, Atmospheric Research, w druku: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.07.016>.
- Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., 2002, *Evaluation and interpretation of the supercell composite and significant tornado parameters at the storm prediction center*, [w:] *21st Conference on Severe Local Storms*, San Antonio.
- Thompson R.L., Edwards R., Mead C.M., 2004, *An update to the Supercell Composite and Significant Tornado Parameters*, [w:] *22nd Conference on Severe Local Storms*, American Meteorological Society, Hyannis, MA
<http://www.spc.noaa.gov/publications/allpapers.html#>.
- Tuszyńska I., 2012, *Niestandardowe metody analizy zdarzeń ekstremalnych*, prezentacja na: *XII Ogólnopolska Szkoła Nadzwyczajnych Zagrożeń 9–11.09.2012, Kraków*, materiały pokonferencyjne.
- Yussouf N., Stensrud D.J., 2010, *Impact of high temporal frequency phased array radar data to storm-scale ensemble data assimilation using observation system simulation experiments*, Monthly Weather Review, 138, 2, s. 517–538.
- Wakimoto R., Wilson J.W., 1989, *Non-supercell tornadoes*, Monthly Weather Review, 117, 6, s. 1113–1140.

- Wilczak J.M., Oncley S.P., Bedard Jr. A.J., 1992, *Turbulent Pressure Fluctuations in the Atmospheric Surface Layer. Preprints, 10th Symposium on Turbulence and Diffusion, Portland, Sep. 29–Oct. 2*, American Meteorological Society, Boston, s. 167–170.
- Walczakiewicz S., Ostrowski K., Surowiecki A., 2011, *Warunki synoptyczne występowania trąb powietrznych w Polsce w latach 2001–2010*, [w:] *Współczesne trendy w naukach o Ziemi. Geo-Symposium Młodych Badaczy Silesia, Cieszyn, 19–21.10.2011*, s. 43–52; <http://www.geosymp.wnoz.us.edu.pl/2012/images/4Geo-symposium.pdf>.

[Wpłynęło: styczeń; poprawiono: czerwiec 2013 r.]

MATEUSZ TASZAREK

FORECASTING THE POSSIBLE EMERGENCE OF TORNADOES IN POLAND

This paper assesses current possibilities for tornado forecasting to take place in Poland. To that end, the author reviews current research relating to the mechanisms of tornadogenesis and tornado climatology in Poland. It is noted that tornado activity peaks in the May–August period, and between 4 pm and 8 pm. While the long-term average incidence of tornadoes stands at about 4 incidents per year, recent years have seen an increase in activity to 10–12 cases per year. Today we can distinguish two mechanisms responsible for tornadogenesis: the mesocyclonic and the non-mesocyclonic. The first mechanism applies to typical strong tornadoes associated with the presence of a mesocyclone (supercell), in which updrafts and downdrafts are separated. This tornado type can last for several hours and is much more readily detected and predicted, since the environment in which it is created is very characteristic. The second tornado type, often called the landspout, is less dangerous, but more difficult to predict. On the basis of current achievements in science in general, and meteorological methodology in particular, the author describes 3 methods applied in tornado prediction, i.e. numerical weather models, nowcasting, and atmospheric soundings. On the basis of this, he then sets four operational levels for tornado forecasting. The first level is mostly based on global numerical weather models, and provides for the issuing of forecasts on the basis of analysed thermodynamic and kinematic parameters associated with tornadoes. The second level is similar, but also includes analysis of local mesoscale numerical weather models, as well as current atmospheric soundings. The third level is characterized mainly by the use of teledetection data with a view to identifying and monitoring convective cells. The last level in turn sees specialized radar products used in mesocyclone, hook-echo detection.

In Poland, the most important institution dealing with convective issues is the Institute of Meteorology and Water Management (IMGW), which has access to the specialised infrastructure helping it to track and detect convective processes. This consists of the POLRAD remote sensing system (meteorological radar), as well as PERUN (lightning detection). The warnings for dangerous meteorological phenomena are on a 3-point scale, and are given by the BPM (regional meteorological forecasting office). In addition, warnings and forecasts are provided to Crisis Management Centres and institutions responsible for from the reactions to emerging threats. ESTOFEX (the European Storm Forecast Experiment) issues forecasts daily, and forecasts expected convective phenom-

ena using a 3-point severity scale (for hail, lightning, tornadoes and strong winds). The products of ESTOFEX have a high level of verifiability, though the lack of nowcasting means that they do not detect any direct threat, instead indicating hazardous areas.

The Institution that deals with both nowcasting and mesoscale forecasting is Skywarn, the European association whose Polish branch is "PolscyŁowcyBurz". Skywarn Poland uses publicly-available data - global numerical weather models and remote sensing. Skywarn Poland engages in mesoscale forecasting using a 3-point scale for convection phenomena hazards (hail, lightning, tornadoes and strong winds), also providing nowcasting analysis and issuing up-to-date warnings for individual regions. Analysis shows that effective warning issuance for the occurrence of tornadoes enjoys greatest accuracy on the second and third levels, albeit with the accuracy and verifiability of the forecasts remaining relatively low at this stage. Poland has the technical possibilities to monitor effectively the radar echoes associated with tornadic supercells on the fourth level. However, due to the limited incidence of tornado phenomena in Poland, specialized warning systems are lacking, ensuring that the achievable reaction time is too short for timely warnings to be issued to the public.

