

Prof. dr hab. Maria Stopa-Boryczka

## Recenzja

### **rozprawy doktorskiej mgr Joanny Popławskiej p.t. *Zastosowania wybranych metod detekcji tornad i trąb powietrznych na obszarze Polski – studia przypadków***

Rozprawa doktorska o objętości 372 stron składa się z 7 rozdziałów (295 stron), spisu literatury (27 stron – 321 pozycji) oraz spisów tabel, rysunków i załączników (razem 50).

Najpierw, w rozdz.1. *Wprowadzenie* przedstawiono cel pracy, materiały źródłowe i metody badań oraz przegląd literatury dotyczącej badań tornad i trąb powietrznych w Stanach Zjednoczonych i w Europie.

Następnie w rozdziale 2. *Zjawisko tornada i trąby powietrznej* omówiono rodzaje wiatrów w przyziemnej atmosferze, poświęcając dużo uwagi ruchom wirowym powietrza. Scharakteryzowano układy konwekcyjne sprzyjające powstawaniu trąb powietrznych i tornad czyli komórki burzowe, superkomórki burzowe, cyklony zwrotnikowe i inne. Podano definicje wirów powietrznych, klasyfikacje, rodzaje oraz miary ich intensywności, stosowaną dotychczas także w Polsce skalę F (Fujita z 1971 r) według prędkości wiatru i zniszczeń spowodowanych przez trąby powietrzne. Na przykład szacowana największa prędkość wiatru według tej skali to 18-32 ms<sup>-1</sup> (F0) wiry słabe), 33-116 ms<sup>-1</sup> (F1-F3) silne), 117-142 m/s (F4-F5) wiry gwałtowne oraz wiry o jeszcze większej prędkości powyżej 142 ms<sup>-1</sup> (> 511,2 kmh<sup>-1</sup>). W Europie stosowana jest w ocenie prędkości wiatru w wirze również skala T, określona wzorem  $T = \frac{B}{2} - 4$ , zależna od skali Beauforta B (str. 100). Funkcją odwrotną jest  $B = 2(T+4)$ , a nie jak podano obok tego wzoru  $B = 2(T - 4)$ .

W rozdziale 3. *Charakterystyka wybranych narzędzi badawczych w detekcji tornad i trąb powietrznych* wzięto pod uwagę obrazy i inne dane o częstotliwości, amplitudach i przesunięciach fazowych fal elektromagnetycznych, po odbiciu od poruszających się chmur (kropelek wody), otrzymane z naziemnych radarów meteorologicznych (efekt Dopplera).

Miarą mocy echa radarowego jest suma (Z) szóstych potęg średnicy wszystkich kropelek wody w chmurze ( $D^6$ ) tzw. odbiciowość, podzielona przez kwadrat odległości chmury od radaru.

W badaniach radarowych atmosfery wzięto pod uwagę kilka rodzajów obrazów, otrzymanych przy odpowiednim ustawieniu anteny np.: MAX (w przedziale 5- 60 dBZ) – obraz dalekiego zasięgu (do 250 km), umożliwiający identyfikację obszarów, w których mogą występować groźne zjawiska pogodowe; PCAPPI (dBZ) – obraz radarowy poziomy odbiciowości (sumy Z) na określonej wysokości; CAPPI (V) – poziomy rozkład prędkości radialnej (w przedziale od 0 do 30 ms<sup>-1</sup>) na stałej wysokości, umożliwiający identyfikację stref dywergencji w zjawiskach wirowych: EHT – rozpiętość pionowa wierzchołków echa radarowego; VVP – obraz radarowy bliskiego zasięgu (do 120 km) rozkładu wektora prędkości wiatru (ms<sup>-1</sup>) na określonej wysokości nad stacją radarową i inne.

W pracy wykorzystano dane z sieci radarowej POLRAD składającej się z 8 radarów meteorologicznych, zlokalizowanych w miejscowościach: Ramża, Pastewnik, Legionowo, Rzeszów, Poznań, Świdwin, Gdańsk i Brzuchania (od roku 2004), które w zasięgu ok. 200 km pokrywają prawie cały obszar Polski.

W badaniach rozwoju trąb powietrznych i tornad wykorzystano diagramy aerologiczne o godzinie 00.00 i 12.00 UTC. Opracowano wykresy izobar, izoterm, adiabat suchego i wilgotnego powietrza oraz krzywą stanu powietrza unoszonego z ziemi, pionowy profil temperatury powietrza (krzywą stratyfikacji) i pionowy profil temperatury punktu rosy. Umożliwiły one określenie charakterystycznych poziomów (wysokości) dla unoszącego się od powierzchni Ziemi do góry powietrza np. LCL – poziom kondensacji (m), LFC – poziom swobodnej konwekcji (m), EL – poziom równowagi (m) i innych.

Wskaźniki konwekcyjne obliczane były w odniesieniu do powietrza: sb – unoszącego się z powierzchni Ziemi (z wysokości 2m), mu – o najwyższej temperaturze w warstwie 0-3 km i ml – o średniej temperaturze w warstwie 0-0,5 lub 0-1 km.

Konwekcję w atmosferze określono, podając wartości głównego wskaźnika CAPE (Jkg<sup>-1</sup>) według wzoru na energię potencjalną unoszącego się do góry powietrza o wyższej temperaturze od otoczenia (o mniejszej gęstości), wywołaną przez siłę wyporu (Archimedes) w całej warstwie konwekcyjnej – od poziomu swobodnej konwekcji do poziomu równowagi. Informuje on o stanie atmosfery (CAPE < 0 – niemożliwy rozwój trąb powietrznych, CAPE > 3500 Jkg<sup>-1</sup> – pewny rozwój tornad). Jako miarą stabilności atmosfery przyjęto wskaźnik CIN (Jkg<sup>-1</sup>) – według wzoru na całkowitą energię powietrza o niższej temperaturze od otoczenia potrzebna do rozwoju konwekcji w warstwie – od powierzchni ziemi do poziomu swobodnej konwekcji. Gdy CIN < -200 Jkg<sup>-1</sup> – to niemożliwa jest konwekcja, a przy CIN ≥ 0 – może



wystąpić tornado. Miarą stabilności jest również różnica LI temperatury powietrza uniesionego z powierzchni Ziemi i jego otoczenia na poziomie 500 hPa ( w przedziale  $-6 < LI \leq 6$  °C) oraz EI – różnica energii termicznej między poziomami 500 i 850 hPa (od  $-2$  do  $\geq 0$  Jkg<sup>-1</sup>) i inne.

Należy zauważyć rozbieżność między symbolami występującymi we wzorach definiujących wskaźniki CAPE i CIN (strony 120 i 122) z ich objaśnieniami i rysunkami. We wzorze określającym wskaźnik energii potencjalnej CAPE = ... jest  $Z_{SFC}$ , a powinno być  $Z_{LFC}$  – zgodnie z objaśnieniem wzoru (gdzie:  $Z_{LFC}$ ) i rys. 86. *Diagram termodynamiczny ...*. Natomiast we wzorze na wskaźnik CIN = ... granice całkowania  $Z_{FLC}$ ,  $Z_{EL}$  i objaśnienie wzoru (gdzie:  $Z_{FLC}$ ,  $Z_{EL}$ ) nie są zgodne z rys. 87, a dotyczą definicji wskaźnika poprzedniego – energii potencjalnej CAPE.

Wzięto też pod uwagę pionowy przyrost prędkości wiatru w warstwie atmosfery o grubości np. 6 km ( tzw. uskoku wiatru). Jedną z miar pola wiatru jest długość (ms<sup>-1</sup>) różnicy wektorów prędkości wiatru na poziomie 6 km ( $V_1$ ) i na poziomie 0 km ( $V_2$ ) – DLS, gdzie  $DLS < 10$  – może wystąpić burza,  $DLS \geq 20$  – może wystąpić superkomórka burzowa. Zdefiniowany wskaźnik zmiany wektora prędkości wiatru LTS dotyczy warstwy 0-1km, a wskaźnik SRW warstwy 500-300 hPa i inne.

W rozdziale 4. *Tornado i trąby powietrzne w Polsce* omówiono liczbę przypadków tych zjawisk w ujęciu historycznym – w XIV-XX wieku, w latach 2000-2014, 2004-2012 i 2006-2012. Wykorzystano bazę danych o groźnych zjawiskach pogodowych o nazwie European Severe Weather Database (ESWD), tj. daty i godziny przejścia danego zjawiska, jego lokalizacji (współrzędnych geograficznych), intensywności jak też kierunku przemieszczania się. W bazie danych ESWD wzięto pod uwagę raporty o informacjach: QC2 – całkowicie zweryfikowanych, QC1 – potwierdzonych, QC0+ dość prawdopodobnych i QC0 dotychczas nie sprawdzonych przez służby pogodowe.

Nad obszarem Polski w XVI- XX wieku, potwierdzono wystąpienie 175 wirów (QC1) i zweryfikowano 26 przypadków (QC2). Ten znaczny wzrost liczby tornad i trąb powietrznych w kolejnych stuleciach XVI-XX (rys. 93) , według QC1 – 2, 3, 20, 49, 101 może wynikać nie tylko ze zmian klimatu, lecz także z postępu w metodach rejestracji liczby komórek burzowych. Trąby powietrzne najczęściej występowały w czerwcu (71 przypadków) i maju (50), najwięcej wirów zanotowano o godz. 12.00. W latach 1300-1999 najwięcej tornad i trąb powietrznych wystąpiło w województwie dolnośląskim (39), zachodniopomorskim (34) i

lubuskim (28). Interesujące są mapy rozmieszczenia tornad i trąb powietrznych na obszarze Polski w kolejnych wiekach od XIV do XX (rys. 102-105).

Dużą wartość poznawczą mają wyniki badań atmosfery ziemskiej przedstawione w rozdziale 5. *Uwarunkowania i przebieg wybranych przypadków tornad i trąb powietrznych na obszarze Polski (2006-2012)*. Stan atmosfery podczas trwania niektórych trąb powietrznych i tornad określono na podstawie obrazów radarowych, map synoptycznych Europy o godz. 12.00 UTC (IMGW) oraz 80 diagramów aerologicznych w odpowiednich miejscowościach (o godzinie 0.00 i 12.00 UTC).

Analizę przeprowadzono na przykładach wybranych 2 trąb powietrznych, które wystąpiły w dniach 13 VIII 2011 – w województwie kujawsko-pomorskim i 10 VIII 2012 r – nad Morzem Bałtyckim oraz 3 tornad działających w dniach 20 i 22 VII 2007 r. – w województwach śląskim, łódzkim i świętokrzyskim, 15 VIII 2008 r – w opolskim, śląskim i łódzkim) oraz 14 VII 2012 r. – nad północną częścią Polski).

Z sondaży aerologicznych z Wrocławia, Legionowa, Łebie i Lindebergu wynika (rys. 157), że w dniu 13 VIII nad Polską zalegała chłodna masa powietrza. Według mapy synoptycznej Europy o godzinie 12.00 (IMGW) w nocy 12-13 VIII r. nad Polskę napłynęło ciepłe i wilgotne powietrze polarno morskie. Maksymalne wartości wskaźnika odbicia radarowego MAX (dBz) komórki burzowej, która wywołała trąbę powietrzną o godzinie 14.50, wyniosły 55,16 dBz. Obraz EHT chmury wykonany przez radar w Poznaniu wskazał, że wierzchołki chmury Cumulonimbus, która wywołała trąby powietrzne rozwijały się poniżej wysokości 12,5 km, w pionowym profilu wiatru (VVP) powietrze napływało z kierunku północno-zachodniego z prędkością do  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Największa ilość energii potencjalnej  $\text{CAPE} = 1310 \text{ Jkg}^{-1}$ , która wystąpiła w Łebie i wartość wskaźnika  $\text{CIN} = -10 \text{ Jkg}^{-1}$  świadczyły o umiarkowanej niestabilności atmosfery.

Niewiadomo dlaczego na str. 179, przy omawianiu uwarunkowania trąby powietrznej, która wystąpiła w dniu 13 VIII 2011, w podpisie rys.157. *Diagramy aerologiczne i wskaźniki konwekcyjne we Wrocławiu, Legionowie, Łebie i Lindebergu ...* jest data 10 VIII 2011, zamiast 13 VIII 2011.

Trąba powietrzna w dniu 10 VIII (nad Morzem Bałtyckim) w odróżnieniu od poprzedniej wystąpiła, gdy nad Polską zalegała masa powietrza ciepłego. Analizowano ją korzystając z diagramów aerologicznych i wskaźników konwekcyjnych o godzinie 00.00 i 12.00 UTC w Łebie, Kaliningradzie, Greifswaldzie i Lindenburgu.



Przez obszar Polski przeszły także superkomórki burzowe, które wywołały tornada: w dniach 20 i 22 VII 2007 r. – w województwach śląskim, łódzkim i świętokrzyskim, 15 VIII 2008 r – w opolskim, śląskim i łódzkim) oraz 14 VII 2012 r. – nad północną częścią Polski).

Z sondaży aerologicznych z Wrocławia, Legionowa, Prostejowa i Popradu wynika, że w dniu 20 VII 2007 nad Polską zalegała masa powietrza ciepłego, a wskaźniki konwekcyjne które obliczono wskazywały chwiejność atmosfery. Poziom kondensacji ( $_{sb}LCL$ ) w Popradzie wyniósł 3080 m, a najwyższy poziom swobodnej konwekcji ( $_{mu}LFC = 4950$  m) wystąpił w Legionowie. Największa wartość energii potencjalnej w odniesieniu do powietrza unoszącego się z ziemi we Wrocławiu osiągnęła wartość  $_{sb}CAPE = 1380 \text{ Jkg}^{-1}$ .

Natomiast 15 VIII 2008 r. nad Polską utworzyły tornada, którym towarzyszyły silne porywy wiatru, ulewy i gradobicia, a największe szkody wystąpiły w województwach opolskim, śląskim i łódzkim. Z diagramów aerologicznych we Wrocławiu, Legionowie, Prostejowie i Popradzie wynikało, że nad Polskę napłynęło wilgotne powietrze o małej chwiejności. Ilość energii potencjalnej CAPE w warstwie do 3km mniejsza od  $100 \text{ Jkg}^{-1}$  nie wskazywała na rozwój niebezpiecznych zjawisk wirowych.

Z sondaży aerologicznych w Łebie, Kaliningradzie, Legionowie i Wrocławiu wynika, że podczas tornada 14 VII 2012 r. nad Polską zalegała ciepła mało chwiejna masa powietrza (stabilna atmosfera). Na możliwość wystąpienia tornad wskazywał jednak wskaźnik CAPE w warstwie 0-3km, np. w Łebie  $_{sb}CAPE = 170 \text{ Jkg}^{-1}$ .

Na 80 diagramach aerologicznych (legenda – prawa strona) podane są wartości 27 wskaźników konwekcyjnych: SLAT, SLON, SELV, SCHOW, LEFT, LFTW, SWET, KINX, CTOT, VTOT, TOTL, CAPE, CAPV, CINGS, CINV, EQLV, EQTV, LFCT, LFCV, BRC, BRCV, LCLT, LCLP, MLTH, MLMR, THCK i PWAH, których nie ma (z wyjątkiem energii potencjalnej CAPE) w rozdziale 1.4. *Spis wybranych pojęć i skrótów stosowanych w pracy*. Nie ma o tych wskaźnikach konwekcyjnych żadnej informacji.

Największą wartość naukową, w odniesieniu do literatury z zakresu zjawisk burzowych i trąb powietrznych, mają wyniki badań statystycznych 59 zjawisk wirowych (22 tornad i 37 trąb powietrznych), które wystąpiły w latach 2006-2012 nad obszarem Polski, przedstawione w rozdziale 6. *Zastosowanie wybranych metod detekcji tornad i trąb powietrznych na obszarze Polski ...*

Dużo ważnych informacji o tornadach i trąbach powietrznych dostarczyły przede wszystkim histogramy 25 wskaźników charakteryzujących zjawiska wirowe, przedstawione

na rys. 212-236. Są to empiryczne rozkłady liczebności tornad i trąb powietrznych w ustalonych przedziałach wartości wskaźników określających stan atmosfery.

Szczególne znaczenie w badaniach uwarunkowań występowania tornad i trąb powietrznych nad obszarem Polski mają wskaźniki: LCL (m) – poziom kondensacji, LFC (m) – poziom swobodnej konwekcji, EL (m) – poziom równowagi, CAPE ( $\text{Jkg}^{-1}$ ) – wartość energii potencjalnej w warstwach powietrza 0-6 km i 0-3 km, CIN ( $\text{Jkg}^{-1}$ ) – wartość energii wstrzymującej procesy konwekcyjne, DCAPE ( $\text{Jkg}^{-1}$ ) – wskaźnik energii potencjalnej dla prądów zstępujących, LI ( $^{\circ}\text{C}$ ) – wyporność cząstki powietrza, SSI ( $^{\circ}\text{C}$ ) – wskaźnik określający stabilność atmosfery oraz wskaźniki charakteryzujące pionowy profil wiatru (tzw. uskok wiatru).

Maksima liczebności tornad i trąb powietrznych na tych histogramach wskazują przedziały wartości wskaźników konwekcyjnych o maksymalnym prawdopodobieństwie.

Trąby powietrzne występowały najczęściej, gdy np. wskaźnik LCL/CCL zawierał się w przedziale 500-1000 m n.p.g., a tornada pojawiały się przy wartościach nie przekraczających 500 m n.p.g. 55 przypadków zjawisk wirowych wystąpiło w Polsce, gdy wskaźnik średniej (w warstwie 0-0,5 km) energii potencjalnej powietrza mCAPE zawierał się w przedziale 0-500  $\text{Jkg}^{-1}$ .

Na histogramach tych wyodrębniono liczbę trąb lądowych, trąb wodnych, tornad i tornad słabych (szkwałowych – gustnado).

Nie uzasadniono dlaczego na osi poziomej we wszystkich histogramach podano szerokości przedziałów klasowych badanego wskaźnika, a nie wartości tego wskaźnika (zgodnie z definicją histogramu). W przypadku np. wskaźnika LCL/CCL [m] (rys. 212, str. 249) oś poziomą opisano: <0, 500) <500-1000) <1000, 1500) < 1500,2000) < 2000, +∞) zamiast: 0 500 1000 1500 2000 > 2000

Dużo interesujących informacji o tornadach i trąbach powietrznych dostarczyły również percentyle tych samych 25 wskaźników określających stan atmosfery zestawione w tab. 35-59. Prawdopodobieństwo wystąpienia tornada lub trąby powietrznej poniżej tych wartości progowych wskaźnika (dystrybuanta empiryczna) wynosi 10%, 25%, 50 % (mediana), 75% i 90%. Stąd wiadomo, że np. 75% tornad wystąpiło przy wskaźniku mniejszym od sbLCL/CCL= 1108 m oraz przy energii potencjalnej sbCAPE mniejszej od 838  $\text{Jkg}^{-1}$ . Ponadto zestawiono (tab. 60) liczbę trąb powietrznych, z podziałem na lądowe i wodne, oraz liczbę



tornad w Polsce w latach 2006-2012 w przedziałach klasowych poszczególnych wskaźników, konwekcyjnych i charakteryzujących pionowe zmiany wiatru.

W pracy wykazano, że najlepsze w detekcji wirów powietrznych na obszarze Polski okazały się wskaźniki poziomu kondensacji LCL i energii potencjalnej CAPE oraz wskaźniki DLS i LLS, związane z pionowym profilem wiatru (tzw. uskokiem wiatru w warstwie 0-6 km).

Analizowane empiryczne histogramy rozkładów liczebności zjawisk wirowych w ustalonych przedziałach wartości wskaźników konwekcyjnych i percentyle dotyczą prób losowych. Szkoda, że nie porównano ich (stosując odpowiednie testy statystyczne) z histogramem i dystrybuantą teoretyczną np. normalnego lub innego rozkładu prawdopodobieństwa w populacji.

Wskazane w recenzji poprawki i nieścisłości nie mają wpływu na otrzymane wyniki badań i ich interpretację.

Trzeba podkreślić, że recenzowana rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki badań trąb powietrznych i tornad w Polsce w latach 2006-2012, które odniesiono do obszernej literatury krajowej i zagranicznej.

Dlatego też stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie „o stopniach naukowych i tytule naukowym ...” (z dnia 14 marca 2003 r.). Jednocześnie składam wniosek Wysokiej Radzie Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr Joanny Popławskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

M. Stopa - Bonczak