

## UWARUNKOWANIA METEOROLOGICZNE SILNYCH BURZ – ANALIZA PRZYPADKU Z 10 LIPCA 2020 ROKU

DAWID STĘPCZYŃSKI

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,  
Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego  
oraz Stowarzyszenie Skywarn Polska, Warszawa

**Abstract:** *Meteorological Conditions of Severe Storms – Case study of 10 July 2020.* Considered the most dangerous type of thunderstorm, supercell thunderstorms appear in strictly defined meteorological conditions in the troposphere. Predicting their location is particularly problematic in an environment of strong vertical wind shear and low instability. An example of such a situation is the supercell that contributed to the development of the tornado on July 10, 2020 at 18:10 CEST in Ustronie Morskie. On that day, two dangerous supercells were also created, which, at the peak of activity, passed over Lubusz and Masovian Provinces. The tornado in Ustronie Morskie was formed on the wavy front, while the supercell developing in Lubusz and Mazovia Land was observed on the cold front. Large hail and damaging wind gusts associated with the downburst in the west of the country took place in higher atmospheric instability than the other cases. The MLCAPE was over 200 J kg<sup>-1</sup> higher than that for peak activity of the other storms discussed in the paper. This could have been crucial for the formation of the largest hail recorded on July 10, 2020 in Poland. The highest values of wind shear and storm relative helicity occurred on the coast which could have influenced the formation of a tornado despite the low values of atmospheric instability. The hook echo radar signature in Mazovia Land developed with a similar MLCAPE as the tornado on the coast (nearly 500 J kg<sup>-1</sup>). On the other hand, the MUCAPE and SBCAPE was much higher there (approx. 500 J kg<sup>-1</sup> more), and so was the LCL level. This proves a higher humidity deficit in the lower troposphere in the place where the hook echo passes. With regard to the ESTOFEX and Skywarn Polska convection outlook, the tornado was the most difficult phenomenon to predict. Hail and damaging wind gusts not related to rotation coincided to a greater extent with the convective outlook.

**Keywords:** convective indicators, meteorological reanalysis, supercell, convective outlook

### WSTĘP

Elementem charakterystycznym superkomórek burzowych (ang. *supercell storm*) jest istnienie mezocyklonu (Doswell i Burgess, 1993; Brooks i in. 1994; Moller i in. 1994; Walczakiewicz i in., 2011), czyli rotacji w obrębie prądu wstępującego powietrza. Ten rodzaj burz wiąże się z licznymi zagrożeniami, wśród których wyróżnić można niszczące porywy wiatru, opady dużego gradu czy trąby powietrzne (Brooks i in. 1994). Choć duża liczba tornad nie jest powiązana z mezocyklonem, to zdecydowana większość silnych tornad (F2–F5) jest powiązana z burzą superkomórkową (Markowski i Richardson 2009). W związku z tym określenie warunków atmosferycznych sprzyjających rozwojowi superkomórek burzowych, a tym samym silnych trąb powietrznych jest obiektem zainteresowania

wielu badaczy (Dossvel i Burgess 1993, Rasmussen i Blanchard 1998; Thompson i in. 2007; Markowski i Richardson 2009).

W połowie XX w. liczba i jakość badań nad burzami w Europie była niska w porównaniu ze Stanami Zjednoczonymi (Dotzek i in. 2009; Antonescu i in. 2016; Groenemeijer i in. 2017). Na kontynencie europejskim prognozowanie i rozwój badań naukowych był hamowany brakiem powszechnej wiedzy na temat zagrożeń meteorologicznych (Groenemeijer i in. 2017). Przez długi czas uważano, że trąby powietrzne są na obszarze Europy rzadko spotykane (Dotzek 2001; Taszarek i Brooks 2015). Tymczasem zjawiska te są obecne i pojawiają się regularnie w różnych miejscach Europy, w tym również w Polsce. Na obszarze Polski rocznie notuje się średnio od 8 do 14 tornad z maksimum częstości w lipcu (Taszarek i Brooks 2015).

Ze względu na rozpowszechniane w mediach informacji o tornadach, a także zwiększone możliwości ich dokumentowania (np. dostęp do aparatów cyfrowych) obecnie wiedza społeczeństwa na temat tych zjawisk wzrasta (Taszarek i Brooks 2015). Rozwijanie badań związanych z gwałtownymi zjawiskami atmosferycznymi stało u podstaw założenia organizacji *European Severe Storms Laboratory* (ESSL), która w 2006 r. stworzyła Europejską Bazę Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych (*European Severe Weather Database*, ESWD; Groenemeijer i in. 2017). Raporty ESWD pozwalają na przeprowadzenie analiz czasowo-przestrzennego zróżnicowania gwałtownych zjawisk atmosferycznych o różnej intensywności. Dane te obecnie stanowią źródło wielu prac naukowych omawiających klimatologię burz na terenie Europy (np. Dotzek i in. 2009; Púčik i in. 2015; Taszarek i in. 2019; Taszarek i in. 2020), a także pojedyncze studia przypadków burz na obszarze Polski (np. Taszarek i Suwała 2015; Taszarek i in. 2016; Pilguy i in. 2019; Taszarek i in. 2019).

10 lipca 2020 roku na obszarze znacznej części Polski odnotowano rozwój wielu aktywnych burz niosących niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzkiego zjawiska. Świadczy o tym między innymi liczba raportów zgłoszona do Europejskiej Bazy Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych (ESWD, Dotzek i in. 2009). Największa liczba zgłoszeń dotyczyła silnego wiatru (52). Poza tym pojawiły się także raporty o dużym gradzie (31). Na terenie kraju odnotowana została jedna trąba powietrzna, która wystąpiła w Ustroniu Morskim (woj. zachodniopomorskie). Trąba powietrzna spowodowała zniszczenie ośmiu domów typu holenderskiego oraz kilku samochodów, zerwanie linii energetycznych i powalenie kilku drzew (<https://e-kg.pl/arttykul/to-bylo-standardowe-amerykanske-tornado-meteo-kolobrzeg-o-trabie-powietrznej-w-ustroniu-morskim/673826>). W odniesieniu do skali Fujity (Fujita 1971) na podstawie zniszczeń i udokumentowanych relacji naocznych świadków skalę zniszczeń oceniono na dolną granicę skali F2. Odpowiada to skali zniszczeń EF2 według ulepszonej, zmodyfikowanej skali Fujity (Dossvel i in. 2009). Prędkość wiatru w wirze oszacowano na 180–200 km h<sup>-1</sup> (<https://eswd.eu/>).

W artykule omówiono synoptyczne uwarunkowania superkomórek burzowych rozwijających się w trakcie jednego „incydentu burzowego” nad obszarem naszego kraju. Prace o podobnej tematyce zostały napisane między innymi przez Parfiniewicza (2009), Taszarka i in. (2016), Pilguy i in. (2019), Porębę i Ustrnula (2019). Uwarunkowania synoptyczne superkomórek burzowych występujących na obszarze Polski na podstawie danych z wielolecia określił między innymi Matczak (2020), natomiast dla tornad podobne opracowania wykonali Walczakiewicz in. (2011), Taszarek i Kolendowicz (2013) oraz Walczakiewicz (2020), który dodatkowo wprowadził regionalizację występowania trąb powietrznych w Polsce. Opracowania, w których wyliczono średnie wartości parametrów meteorologicznych dla burz o zorganizowanym charakterze, porównano ze wskaźnikami konwekcyjnymi występującymi 10 lipca 2020 r. na terenie Polski. W ten sposób starano się określić, czy środowisko, w jakim wystąpiły superkomórki burzowe generujące niszczące porywy wiatru, opady dużego gradu i występowania tornad, były sprzyjające oraz jakie czynniki mogły osłabić, a jakie wzmocnić potencjał ich rozwoju. Do porównania użyto prac Amerykanów, którzy jako prekursorzy badań nad silnymi burzami określili dla obszaru Stanów Zjednoczonych uwarunkowania synoptyczne tych zjawisk. Jednakże specyfika warunków atmosferycznych, w jakich występują burze nad Stanami Zjednoczonymi, różni się w niektórych aspektach od tych nad Europą. Przykładowo Grunwald i Brooks (2011) wykazali, że tornada o znacznej sile rozwijają się w Europie przy niższym wskaźniku energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie (CAPE) oraz wyższej wysokości kondensacji pary wodnej (LCL) niż w USA. Bez znanych średnich wartości parametrów konwekcyjnych dla określonych miejsc trudno jest ustalić, jakie wielkości wskaźników konwekcyjnych sprzyjają zagrożeniu tornadami (Taszarek i Kolendowicz 2013).

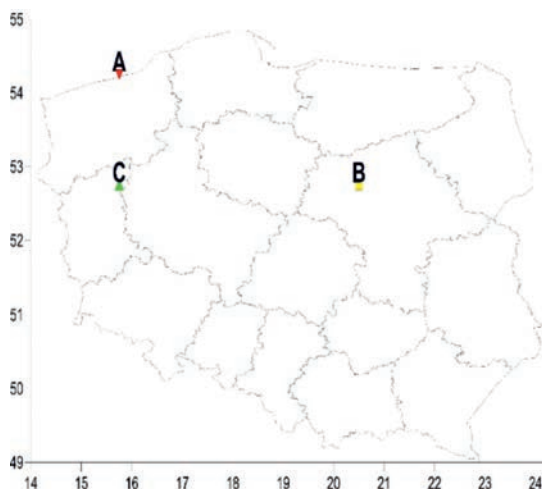
W miarę ciągłego postępu technologicznego i unowocześnienia sieci pomiarowo-obszerności możliwości trafnego prognozowania gwałtownych zjawisk atmosferycznych stają się coraz większe. Meteorologiczna infrastruktura pomiarowa na obszarze Polski, dzięki rozwojowi sieci PERUN oraz POLRAD, a także poprawie monitoringu zjawisk niebezpiecznych uległa dużym zmianom (Taszarek 2016). W dalszym ciągu występują jednak ograniczenia związane ze zbyt małą wiedzą na temat czynników lokalnych oddziaływających na burze oraz niewystarczającej rozdzielczości numerycznych modeli prognostycznych. Według Taszarka (2013), trąba powietrzna jest lokalnym zjawiskiem, jej średnica osiąga zazwyczaj kilkadziesiąt metrów, dlatego do jej badania powinno się używać dokładnych modeli z rozmiarem siatki kilkunastu metrów. Tornado jest o wiele rzędów wielkości mniejsze niż środowisko, w jakim tworzą się procesy przyczyniające się do jego powstania, co może stanowić problematyczne zagadnienie do prognozowania tych zjawisk (Dossvel i in. 1993).

Celem niniejszej pracy było wskazanie warunków synoptycznych określających możliwość wystąpienia trąby powietrznej i innych niebezpiecznych zjawisk

związanych z procesami konwekcji atmosferycznej w dniu 10 lipca 2020 r. nad obszarem Polski.

## METODYKA BADAŃ

Wśród najsilniejszych burz rozwijających się 10 lipca 2020 r. wyróżniono i opisano trzy przypadki. Pierwszy z nich dotyczy burzy superkomórkowej przechodzącej nad obszarem województwa lubuskiego. Burza ta wygenerowała silne, niszczące porywy wiatru oraz opady dużego gradu. Drugi przypadek odnosi się do superkomórki burzowej przynoszącej sygnaturę *hook echo* i niszczące porywy wiatru na Mazowszu. Trzecią analizowaną burzą jest ta, w której wykształciła się mezocyklonalna trąba powietrzna o sile F2 w skali Fujity. Przy wyborze burz brano pod uwagę rodzaj zjawiska i zniszczenia na podstawie raportów ESWD (ryc. 1).



Ryc. 1. Miejsca wystąpienia gwałtownych zjawisk atmosferycznych w dniu 10.07.2020. Literą A oznaczono trąbę powietrzną, literą B niszczące porywy wiatru, literą C opady dużego gradu

Fig. 1. Locations where violent weather phenomena occurred on 10 July 2020. Letter A denotes a tornado, letter B denotes destructive gusts of wind, letter C denotes precipitation of large hail

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://eswd.eu/>.

Source: own elaboration based on <https://eswd.eu/>.

## SYTUACJA SYNOPTYCZNA

Burze w centralnej Europie najczęściej związane są z zatokami niskiego ciśnienia, które inicjują adwekcję cieplejszej masy powietrza w części wschodniej

i chłodniejszej w części zachodniej zatoki (Kolendowicz i in. 2017). W artykule skupiono się na omówieniu rozkładu układów barycznych w Europie oraz mas powietrznych napływających nad Polskę 10.07.2020 roku. W pierwszej kolejności przeanalizowano mapy synoptyczne brytyjskiego *Met Office* (<http://www1.wetter3.de/>). Mapy synoptyczne dostępne są w sześciogodzinnych odstępach czasowych, w czterech terminach w ciągu doby (06, 12, 18, 00 UTC). Do przedstawienia położenia układów barycznych oraz frontów atmosferycznych wykorzystano mapy synoptyczne dolne z godz. 12 oraz 18 UTC (ryc. 2). Posłużono się także analizą geopotencjału oraz temperatury powietrza dla powierzchni izobarycznej 500 hPa globalnego, prognostycznego modelu numerycznego GFS (ang. *Global Forecast System*; ryc. 4) z tych samych godzin. Przedstawiono także analizę temperatury powietrza na powierzchni izobarycznej 850 hPa modelu GFS z 10 lipca 2020 r., godz. 18 UTC (ryc. 2).

## Dane

W celu ustalenia przyczyn rozwoju tornada i innych gwałtownych zjawisk atmosferycznych wykorzystano różnego typu dane opierające się na pomiarach atmosferycznych wykonanych 10 lipca 2020 roku. Wśród nich wyróżniono radary meteorologiczne (podrozdział 2.2.1), sondáže aeorologiczne (podrozdział 2.2.2), dane z raportów ESWD (podrozdział 2.2.3), pomiary ze stacji synoptycznych (podrozdział 2.2.4), reanalizy ERA5 (podrozdział 2.2.5), prognozy konwekcyjne (podrozdział 2.2.6).

### 1. Radary meteorologiczne

Dane teledetekcyjne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW–PIB) poddano analizie dla obrazów radarowych pochodzących z sieci radarów meteorologicznych POLRAD. Aby wskazać potencjał opadów dużego gradu dla przechodzącej superkomórki burzowej przez województwo lubuskie, użyto produktu radarowego ZHAIL wskazującego na prawdopodobieństwo opadów gradu. Sygnatura *hook echo* rozwijająca się na Mazowszu została wyróżniona na podstawie produktu PPI dla określonej elewacji (kąta nachylenia radaru meteorologicznego). Sygnatura *hook echo* pojawia się na niewielkiej wysokości nad powierzchnią ziemi, dlatego należy jej poszukiwać na produkcie PPI lub na produkcie CAPPI z niewielkiej wysokości (Pilorz i Laskowski 2017). W celu wskazania na powiązanie trąby powietrznej z mezocyklonem przedstawiono prędkość wiatru radialnego na produkcie radarowym PCAPPI. Wykrycie superkomórek burzowych jest możliwe dzięki użyciu dopplerowskich radarów meteorologicznych (Poręba i Ustrnul 2019).

## 2. Sondáže aeorologiczne

Pomiary pionowego profilu atmosfery uzyskane za pomocą sondáže aeorologicznych zostały pobrane ze strony internetowej Uniwersytetu Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Do analizy użyto pomiarów ze stacji Greifswald (10184) oraz Legionowo (12374). Dane te wprowadzono do programu komputerowego SHARPy i na jego podstawie obliczono określone wskaźniki konwekcyjne (Blumberg i in. 2017). Przeanalizowano parametry konwekcyjne określające chwiejność atmosfery – wskaźnik MLCAPE (ang. *mixed layer CAPE*). Parametry MLCAPE i SBCAPE (ang. *surface based CAPE*) są równe, gdy w całej przyziemnej warstwie powietrza nie ma niedosytu wilgotności powietrza. W przypadku niedosytu wilgotności powietrza w dolnej troposferze SBCAPE jest znacznie wyższy niż MLCAPE (Bunkers i in. 2002). Do prognozowania burz w godzinach popołudniowych i wieczornych najbardziej przydatny jest parametr MLCAPE (Ostrowski i in. 2010). Przeanalizowane zostały kinematyczne wskaźniki informujące o zmianie kierunku i prędkości wiatru wraz z określoną wysokością. Przedstawiono wskaźniki skrętności wiatru (ang. *storm realtive helicity*, SRH) z warstwy 0–1 km, 0–3 km oraz uskoku wiatru (ang. *SHEAR*) z warstwy 0–6 km (ang. *Deep Layer Shear*) oraz 0–1 km (ang. *Low Layer Shear*). Zbadano także wskaźniki informujące o cechach masy, związane z wilgotnością powietrza, takie jak poziom kondensacji pary wodnej – MLLCL oraz stosunek zmieszania pary wodnej – ML Mixing Ratio. Wszystkie parametry zostały obliczone na podstawie cząstki powietrza z dolnych 100 hPa troposfery (ang. *mixed layer*). Scharakteryzowano w ten sposób środowisko, w jakim rozwijały się gwałtowne burze w Polsce w dniu 10.07.2020 roku.

Sherburn i Parker (2014) przyjęli kryteria, w których wartości SBCAPE równe lub nieprzekraczające  $500 \text{ J kg}^{-1}$  oraz uskok wiatru z warstwy 0–6 km osiagający bądź przekraczający  $18 \text{ m s}^{-1}$  tworzą warunki do rozwoju zjawisk konwekcyjnych znane jako *HIGH SHEAR–LOW CAPE. LOW CAPE* odnosi się do wskaźnika MUCAPE  $\leq 1000 \text{ J kg}^{-1}$  (Sherburn i Parker 2014). Schneider i Dean (2008) stwierdzili, że około 84% wszystkich tornad występujących w latach 2003–2007 na obszarze kontynentalnej części Stanów Zjednoczonych miało związek ze ścinaniem wiatru z warstwy 0–6 km przekraczającym  $15 \text{ m s}^{-1}$ , a 65% wszystkich przypadków z wartościami SHEAR 0–6 km  $> 20 \text{ m s}^{-1}$ . Bardzo ważna jest więc rola pionowych uskoków wiatru w procesie powstawania gwałtownych zjawisk atmosferycznych. Wymienione wyżej parametry konwekcyjne – zarówno termodynamiczne, jak i kinematyczne w połączeniu ze sobą odzwierciedlają charakterystyczne środowisko do rozwoju burz o różnej aktywności i różnym zorganizowaniu.

Skrętność wiatru również jest kluczowym czynnikiem kinematycznym wpływającym na intensyfikację superkomórek burzowych i trąb powietrznych. Matczak (2020) zauważa, że podobnie jak w przypadku innych wskaźników kon-

wekcyjnych, nie ma jednoznacznej granicy wartości parametru SRH 0–3 km, od której rozpoczyna się proces tworzenia burz w formie superkomórek, jednak zwykle są to wartości wynoszące około  $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ . Parametr SRH opisujący wzrost prędkości i zmianę kierunku wiatru w najniższej, jednokilometrowej warstwie troposfery (SRH 0–1 km) jest istotny dla procesu formowania się trąb powietrznych (Rasmussen i Blanchard 1998; Rasmussen 2003; Taszarek i Kolendowicz 2013).

Kolejnym istotnym czynnikiem w procesie inicjacji zjawisk konwekcyjnych jest zawartość pary wodnej w dolnej, przypowierzchniowej warstwie atmosfery (planetarnej warstwy granicznej). Tornada w Polsce mają miejsce głównie w środowisku umiarkowanej i niskiej energii potencjalnie dostępnej konwekcyjnie oraz wysokich wartości wilgotności względnej powietrza w dolnej troposferze (Walczakiewicz i in. 2011; Taszarek i Kolendowicz 2013). Według Matczaka (2020), występowanie trąb powietrznych w całym kraju uwarunkowane jest szerokim zakresem parametrów meteorologicznych, wśród których cechą wspólną najczęściej jest niski poziom kondensacji pary wodnej.

### **3. Dane z raportów Europejskiej Bazy Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych**

Potwierdzeniem wystąpienia burz niosących opady dużego gradu, niszczące porywy wiatru i trąbę powietrzną były relacje naocznych świadków oraz zgłaszane za pośrednictwem członków stowarzyszenia Skywarn Polska (ochotniczej sieci obserwacyjnej) raporty do Europejskiej Bazy Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych (ESWD). ESWD określa zarówno definicję, jak i wymagania do zapisania raportu o określonym zagrożeniu meteorologicznym ([https://www.eswd.eu/docs/ESWD\\_criteria\\_en.pdf](https://www.eswd.eu/docs/ESWD_criteria_en.pdf)). ESWD zgłoszenie o niszczących porywach wiatru (ang. *severe wind gust*) potwierdza w przypadku udokumentowania wystąpienia wiatru w porywie o prędkości wynoszącej  $25 \text{ m s}^{-1}$  lub większej. Zapisywane jest miejsce opadów gradu i średnica gradzin osiągających i przekraczających 2 cm (wzdłuż najdłuższego wymiaru gradziny). Tornado jest definiowane jako „wir rozciągający się między chmurą konwekcyjną a powierzchnią ziemi, w którym wiatr jest wystarczająco silny, aby powodować uszkodzenia obiektów” ([https://www.eswd.eu/docs/ESWD\\_criteria\\_en.pdf](https://www.eswd.eu/docs/ESWD_criteria_en.pdf)). Dane z ESWD dały informację o przestrzennym oraz czasowym zróżnicowaniu różnego typu zagrożeń meteorologicznych występujących nad Polską w dniu 10.07.2020 roku.

### **4. Pomiary ze stacji synoptycznych**

Wartości elementów meteorologicznych ze stacji synoptycznych pozyskano z pomiarów Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW-PIB.

Pomiary ze stacji synoptycznych IMGW–PIB posłużyły do określenia warunków termiczno-wilgotnościowych w okolicy miejsc powstawania sygnatur radarowych *hook echo* oraz wystąpienia tornada. Uwzględniono dane meteorologiczne ze stacji Mława (w pobliżu zdiagnozowanej sygnatury *hook echo*) oraz Dźwirzyno (w pobliżu tornada). Porównano temperaturę, punkt rosy i wilgotność względną powietrza w dwóch różnych lokalizacjach (miejsc, w których istniało podwyższone ryzyko trąb powietrznych). Zawartość pary wodnej w warstwie granicznej atmosfery odgrywa bardzo ważną rolę w procesie formowania się tornad (Walczakiewicz i in. 2011; Taszarek i Kolendowicz 2013), dlatego przeanalizowano ją również przez pomiary ze stacji synoptycznych w Mławie (woj. mazowieckie) oraz Dźwirzynie (woj. zachodniopomorskie) wykonane o godz. 15 i 16 UTC, przed nadejściem gwałtownych zjawisk atmosferycznych (tab. 2).

## 5. Reanalizy ERA5

Sondaże aeorologiczne były wykonane daleko od występujących ekstremalnych zjawisk atmosferycznych (trąba powietrzna około 150 km na wschód od stacji Greifswald), dlatego też pobrano, przetworzono i zwizualizowano dane z reanaliz meteorologicznych ERA5 (Hersbach i in. 2020).

Przestrzenne zróżnicowanie parametrów konwekcyjnych wykonano na podstawie danych z najnowszej reanalizy ERA5 Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium Range Weather Forecasting*, ECMWF). Reanaliza ERA5 zawiera szczegółowy opis warunków atmosferycznych w skali globalnej od roku 1950 do czasu obecnego (Hersbach i in. 2020). ERA5 udostępniana sukcesywnie od 2020 r. dysponuje zarówno dużą dokładnością poziomej siatki obliczeniowej (około 27kilometrową), jak i wysoką rozdzielczością czasową (jednogodzinną) w stosunku do swojego poprzednika ERA–INTERIM (Coffer i in. 2020).

Na podstawie zawartych w reanalizie danych stworzono cztery mapy wskazujące na wartość CAPE w szczytowej aktywności burz (dla godz. 13–16 UTC; ryc. 12). Wskaźniki MLCAPE, SBCAPE, MUCAPE oraz uskok wiatru z warstwy 0–6 km pobrano ze strony internetowej [http://www.rawinsonde.com/ERA5\\_Europe/](http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe/) i przedstawiono je w formie tabeli. Te dwa parametry, tj. pionowe ścinanie wiatru oraz chwiejność termodynamiczna, są jednymi z najważniejszych składników tworzących środowisko dla intensyfikacji burz z określonymi zagrożeniami. Przykładowo opady dużego gradu najbardziej prawdopodobne są przy wysokim wskaźniku CAPE oraz DLS (Pucik i in. 2015; Craven i Brooks 2004; Gronemeijer i Van Delden 2007; Taszarek i in. 2017). Tornada natomiast rozwijają się na obszarze kraju głównie przy niskiej i średniej wartości energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie (Walczakiewicz i in. 2011). Taszarek i in. (2020) wskazali, że na obszarze Europy i USA opady dużego gradu (powyżej 5 cm średnicy) mają miejsce przy większym wskaźniku MLCAPE niż tornada o sile F0–F3.



## 6. Prognozy konwekcyjne

Prognozy konwekcyjne, tworzone przede wszystkim na podstawie wyliczeń modeli numerycznych, odzwierciedlają ograniczenia związane z trafnym przewidywaniem lokalnych zjawisk, takich jak trąby powietrzne czy opady gradu. Z drugiej zaś strony dostarczają one cennych informacji na temat możliwych zagrożeń meteorologicznych w miejscach nieobjętych monitoringiem meteorologicznym. Dane z modeli numerycznych przedstawiają prawdopodobieństwo burz o różnym charakterze i zorganizowaniu, niosących różnego typu niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzkiego zjawiska.

W niniejszej pracy zostały przedstawione prognozy konwekcyjne na dany dzień przygotowane przez organizacje *non-profit*, wśród których wyróżniono European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX) oraz Skywarn Polska – Polscy Łowcy Burz. Prognozy grupy ESTOFEX wydawane były na podstawie obliczanych przez numeryczne modele globalne parametrów termodynamicznych oraz kinematycznych (Taszarek 2013). Miały trzy stopnie zagrożenia określające spodziewaną intensywność gwałtownych zjawisk atmosferycznych na wyznaczonych obszarach (Brooks i in. 2011). Weryfikacje prognoz konwekcyjnych organizacji ESTOFEX, opierając się na latach 2006–2009, przeprowadzili Kowalewski i in. (2010). W wynikach badań autorzy zawarli informację o większej trafności prognoz latem aniżeli zimą. Wielkość obszaru, dla którego były prognozowane wyładowania atmosferyczne, zmniejszyła się w analizowanym okresie, co pozwalało zmniejszyć regiony niezagrożone danym zjawiskiem i uniknąć fałszywych alarmów. Skywarn Polska podobnie jak ESTOFEX wykonuje prognozy konwekcyjne, lecz działalność tej organizacji ogranicza się do obszaru Polski. Zadaniem Skywarn Polska oprócz wydawania prognoz konwekcyjnych są: ostrzeganie bieżące, w formie nowcastingu i monitorowanie niebezpiecznych zjawisk atmosferycznych na terenie kraju.

Wszystkie opisane źródła materiału badawczego i powiązania między nimi pozwoliły na obszernie przedstawienie warunków atmosferycznych występujących 10 lipca 2020 r. nad Polską.

## WYNIKI BADAŃ

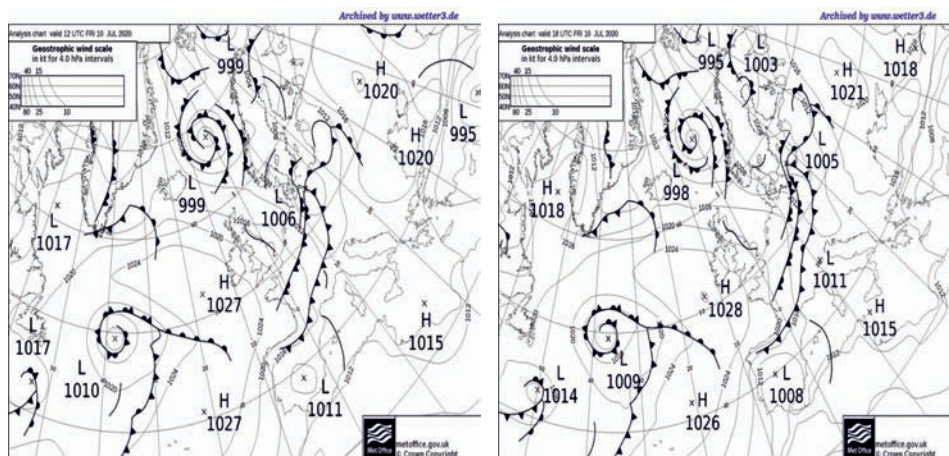
### Sytuacja synoptyczna

10 lipca 2020 r. o godz. 12 UTC obszar zachodniej, północnej i częściowo środkowej Europy znajdował się pod wpływem rozległej długiej fali górnej z głównym ośrodkiem niżowym nad Morzem Norweskim. W jej południowej części od obszaru Zatoki Biskajskiej przez północną Francję, kraje Beneluksu,

północne Niemcy i Polskę ciągnął się front polarny (ryc. 2). Front wykazywał tendencję do wytwarzania fal, z których powstały układy niżowe. Jeden z takich niżów sześć godzin później (o godz. 18 UTC) znalazł się w części południowej Bałtyku przy wschodniej części polskiego wybrzeża (ryc. 2, ryc. 3).

O godz. 12 UTC wzdłuż wybrzeża Morza Bałtyckiego rozciągał się położony w przybliżeniu równoleżnikowo, podlegający zafalowaniu, front atmosferyczny. W godzinach popołudniowych po przemieszczeniu się niżu nad południową część Bałtyku front ten wyraźnie zmienił kierunek przemieszczania i zaczął przesuwać się w kierunku południowo-wschodnim (ryc. 3, ryc. 4). Doprowadziło to do wypierania z zachodniej i północnej Polski cieplej polarnej morskiej masy powietrza.

Mapy synoptyczne brytyjskiego Met Office przedstawiają dwa fronty atmosferyczne powiązane z niżem barycznym, które przemieszczały się nad Polską 10 lipca 2020 roku. Z pierwszą nadciągającą strefą frontalną powiązane były silne burze rozwijające się w woj. lubuskim i mazowieckim, natomiast trąba powietrzna wytworzyła się na drugim froncie atmosferycznym podlegającym zafalowaniu (ryc. 3).

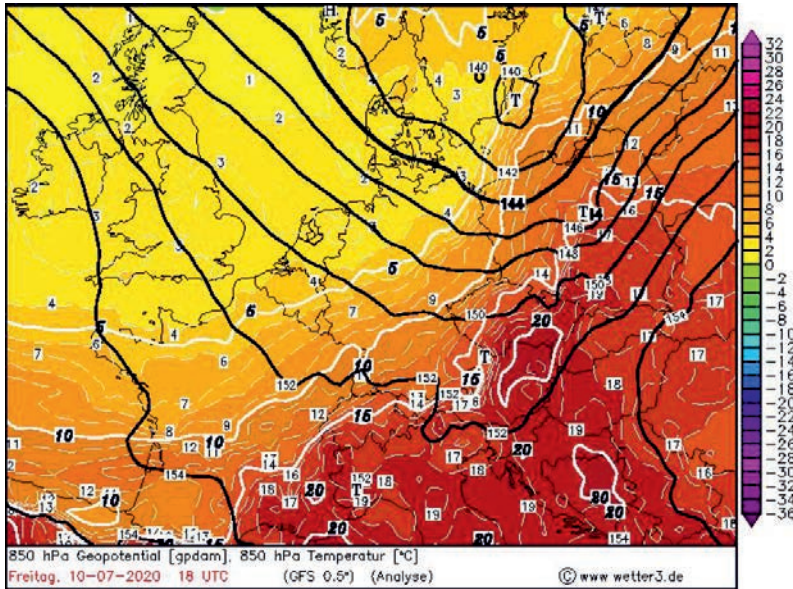


Ryc. 2. Mapa synoptyczna z godz. 12 oraz 18 UTC Brytyjskiego Serwisu Meteorologicznego – Met Office

Fig. 2. Synoptic map from 12 and 18 UTC of the British Meteorological Service – Met Office

Źródło/Source: [https://www.wetter3.de/archiv\\_ukmet\\_dt.html](https://www.wetter3.de/archiv_ukmet_dt.html).

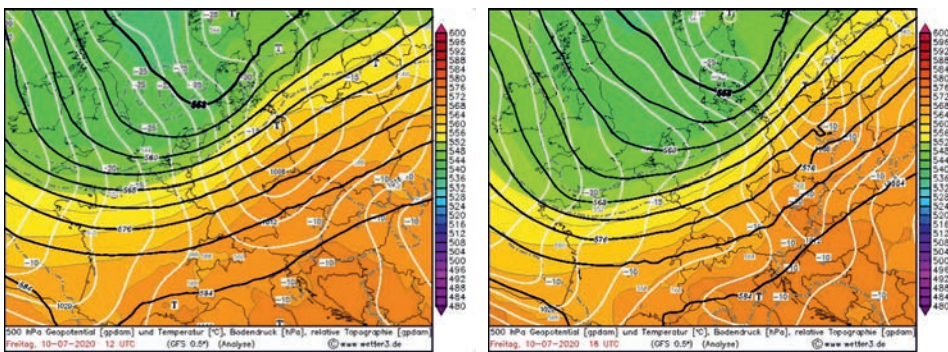
Analiza geopotencjału powierzchni izobarycznej 500 hPa dobrze ukazuje przemieszczanie się z północnego zachodu na południowy wschód Europy frontu polarnego oraz jego zafalowanie w południowej części Bałtyku (ryc. 4).



Ryc. 3. Analiza temperatury powietrza na powierzchni izobarycznej 850 hPa numerycznego modelu prognozowania pogody GFS 0.5° z 10 lipca 2020 r., godz. 18 UTC. Na grafice widoczna jest ciepła masa powietrza we wschodniej i centralnej części Polski oraz chłodniejsza masa powietrza występująca przy północno-zachodnich krańcach Polski

Fig. 3. Analysis of air temperature at the 850 hPa isobaric surface of the GFS 0.5° numerical weather prediction model from 10 July 2020, 18 UTC. The artwork shows a warm air mass in the eastern and central parts of Poland, and a cooler air mass near the north-western borderlands of Poland

Źródło/Source: <https://www.wetter3.de/>.



Ryc. 4. Analiza geopotencjału i temperatury powietrza dla powierzchni izobarycznej 500 hPa numerycznego modelu prognozowania pogody GFS 0.5 ° z 10 lipca 2020 r., godz. 12 i 18 UTC

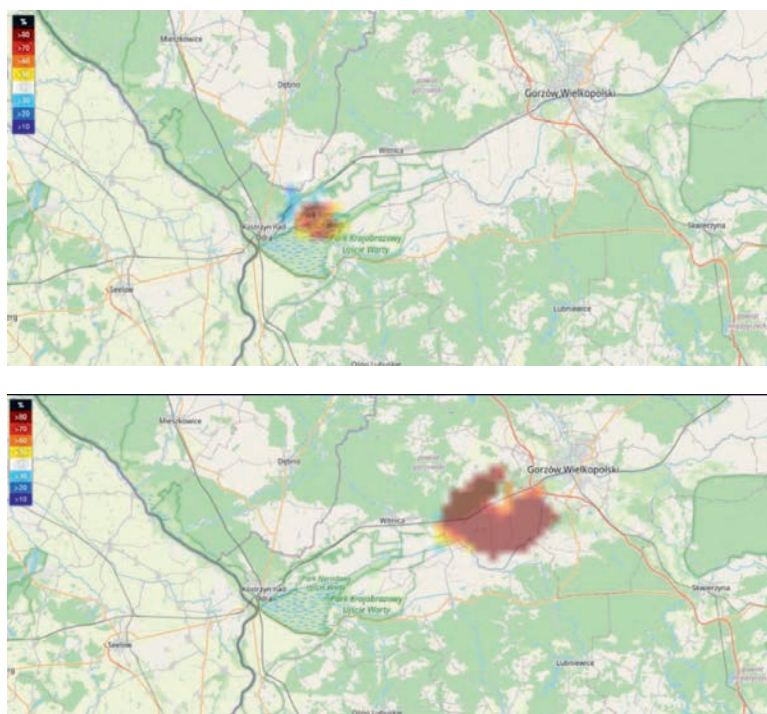
Fig. 4. Analysis of geopotential and air temperature for an isobaric surface of 500 hPa of the GFS numerical weather prediction model 0.5 ° from 10 July 2020, 12 and 18 UTC

Źródło/Source: [http://www1.wetter3.de/archiv\\_gfs\\_dt.html](http://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html).

## 2. Rozwój i przebieg burz oraz opis zjawisk towarzyszących

Około godz. 12:15 UTC na granicy polsko-niemieckiej, w przybliżeniu 10 km na południowy zachód od miejscowości Kostrzyn nad Odrą powstała pojedyncza komórka burzowa, która wraz z przemieszczaniem się w kierunku północno-zachodnim przekształciła się w superkomórkę burzową prawoskrętną (ang. *super-cell right moving*). Przypadki superkomórek prawoskrętnych na obszarze Polski zostały opisane przez Popławską (2014; incydent z 15.08.2008 r.), Taszarka i in. (2016; incydent z 14 lipca 2012 r.) Pilgaj i in. (2019; incydent z 10 czerwca 2016 r.).

W Gorzowie Wielkopolskim (woj. lubuskie) średnica gradzin według raportów zgłoszonych do ESWD osiągnęła, w zależności od dzielnicy miasta, 5–4,5 cm (<https://eswd.eu>). Po przejściu przez Gorzów Wielkopolski w Gościmiu (około 10 km na południowy zachód od Drezdenka) burza wygenerowała opad jeszcze większego gradu – do 5,5 cm średnicy (<https://eswd.eu>). Wraz z rosnącymi wartościami procentowymi na produkcie radarowym ZHAIL zwiększała się liczba raportów o dużym gradzie, a także średnica zarejestrowanych gradzin (<https://eswd.eu>; ryc. 5).



Ryc. 5. Zrzut ekranu przedstawiający rosnące wartości procentowe na produkcie radarowym ZHAIL między godz. 12:30 a 12:50 UTC, 10 lipca 2020 roku

Fig. 5. Screenshot showing increasing percentages on the ZHAIL radar product between 12h30 and 12h50 UTC, 10 July 2020

Źródło/Source: <https://czypada.pl/>.

Przed godz. 14 UTC superkomórka burzowa przyniosła bardzo silne prostoliniowe porywy wiatru związane z prądem zstępującym burzy (*downburst*). *Downburst* został zdefiniowany po raz pierwszy przez Fujitę (1978), który określił to zjawisko jako silny prąd zstępujący (ang. *downdraft*) powodujący wystąpienie niszczących porywów wiatru na ziemi lub przy jej powierzchni. Wskutek oddziaływania opisanego wyżej zjawiska w okolicy wsi Kwiejce i Kwiejce Nowe na obszarze Puszczy Noteckiej udokumentowano rozległe szkody w drzewostanie (ryc. 6).

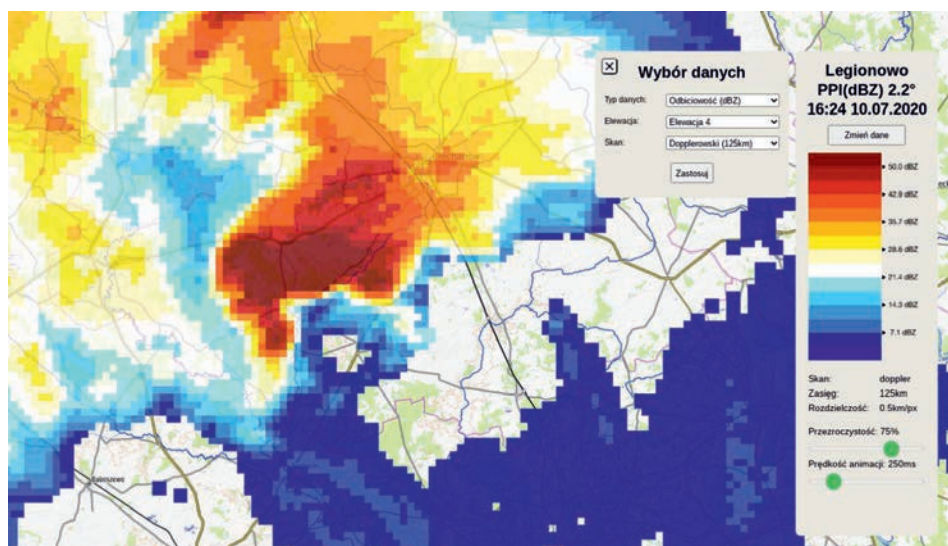


Ryc. 6. Szkody w drzewostanie zaobserwowane w Puszczy Noteckiej po przejściu zjawiska *downburst*. Fot. Patryk Matczak

Fig. 6. Forest stand damage recorded in Notecka Forest after the *downburst* phenomenon. Photo: Patryk Matczak

Po godz. 16 UTC nad obszar powiatu ciechanowskiego dotarła kolejna superkomórka burzowa, gdzie wytworzyła charakterystyczną sygnaturę odbiciowości radarowej w kształcie haka zwaną *hook echo* (ryc. 7). *Hook echo* jest rezultatem cyrkulacji mezocyklonalnej w superkomórce burzowej (Doswell i Burges 1993). Istotny jest fakt, że nie zawsze po utworzeniu się *hook echo* powstaje trąba powietrzna. Przykładowo Forbes (1981) stwierdził, że podczas wystąpienia serii tornad na obszarze Stanów Zjednoczonych w dniu 3 kwietnia 1974 r. (*tornado outbreak*) na 25 analizowanych sygnatur *hook echo* 21 z nich doprowadziło do utworzenia się tornada. Forbes wskazał ponadto, że wystąpiły też trąby powietrzne niepowiązane z *hook echo*, a z innymi sygnaturami radarowymi, które określił jako *distinctive echo*. Markowski i Richardson (2009) podają, że chociaż superkomórki mogą być uważane za względnie łatwe do przewidywania, to prognozowanie tego, które superkomórki wygenerują tornado, jest jednym z najtrudniejszych zadań stających zarówno przed prognostami pogody, jak i naukowcami. Taszarek (2013) pisze, że ze względu na małą skalę zjawiska obecnie nie jest możliwe przewidywanie z dużą dokładnością, gdzie i kiedy wystąpi tornado. Na

Mazowszu, mimo iż pojawiło się *hook echo*, nie odnotowano trąby powietrznej. Pilorz (2014) wskazuje, że nie każda burza superkomórkowa, wykazująca charakterystyczne cechy na obrazach radarowych, wiąże się z występowaniem zagrożeń meteorologicznych. Ważniejsze są warunki meteorologiczne, w jakich dana superkomórka się tworzy. W związku z tym, by oszacować parametry konwekcyjne w pobliżu omawianej sygnatury, należy zbadać dane z sondażu aerologicznego z Legionowa, miejscowości oddalonej około 60 km na południowy wschód od Ciechanowa, co uczyniono w dalszej części pracy.



Ryc. 7. Sygnatura radarowa *hook echo* widoczna na obrazie radarowym PPI 2.2 z dnia 10 lipca 2020 r., godz. 16:24 UTC

Fig. 7. Hook echo radar signature visible on PPI 2.2 radar image of 10 July 2020, 16h24 UTC

Źródło/Source: <http://daneradarowe.pl/>.

W północno-zachodniej części kraju na obrazach radarowych nie była widoczna sygnatura *hook echo*. Mimo to trąba powietrzna się pojawiła. Dokumentacja fotograficzna i analiza ścieżki zniszczeń dokonana przez eksperta od gwałtownych zjawisk atmosferycznych, relacje naocznych świadków i ogólnodostępne zdjęcia oraz filmy ze zdarzenia pozwoliły na sklasyfikowanie trąby powietrznej jako F2 w skali Fujity (Fujita 1971) i T4 w skali Torro (Meaden 1976; <https://eswd.eu/>). Przekłada się to na prędkość wiatru w przedziale 180–200 km h<sup>-1</sup> (<https://eswd.eu/>). Niektóre domy holenderskie okazały się doszczętnie zniszczone (ryc. 8). Skrzynka elektryczna w pobliżu przejścia tornada uległa rozbiciu na mniejsze fragmenty (ryc. 9). Trąba powietrzna była krótkotrwała (około kilku minut), a ścieżka zniszczeń wskazuje na kontakt z powierzchnią Ziemi na odcinku kilkuset metrów. Jej szerokość wyniosła około 60 m, a w wyniku zdarzenia ucierpiało sześć osób.



Ryc. 8. Zniszczony domek holenderski po przejściu trąby powietrznej. Grafika własna

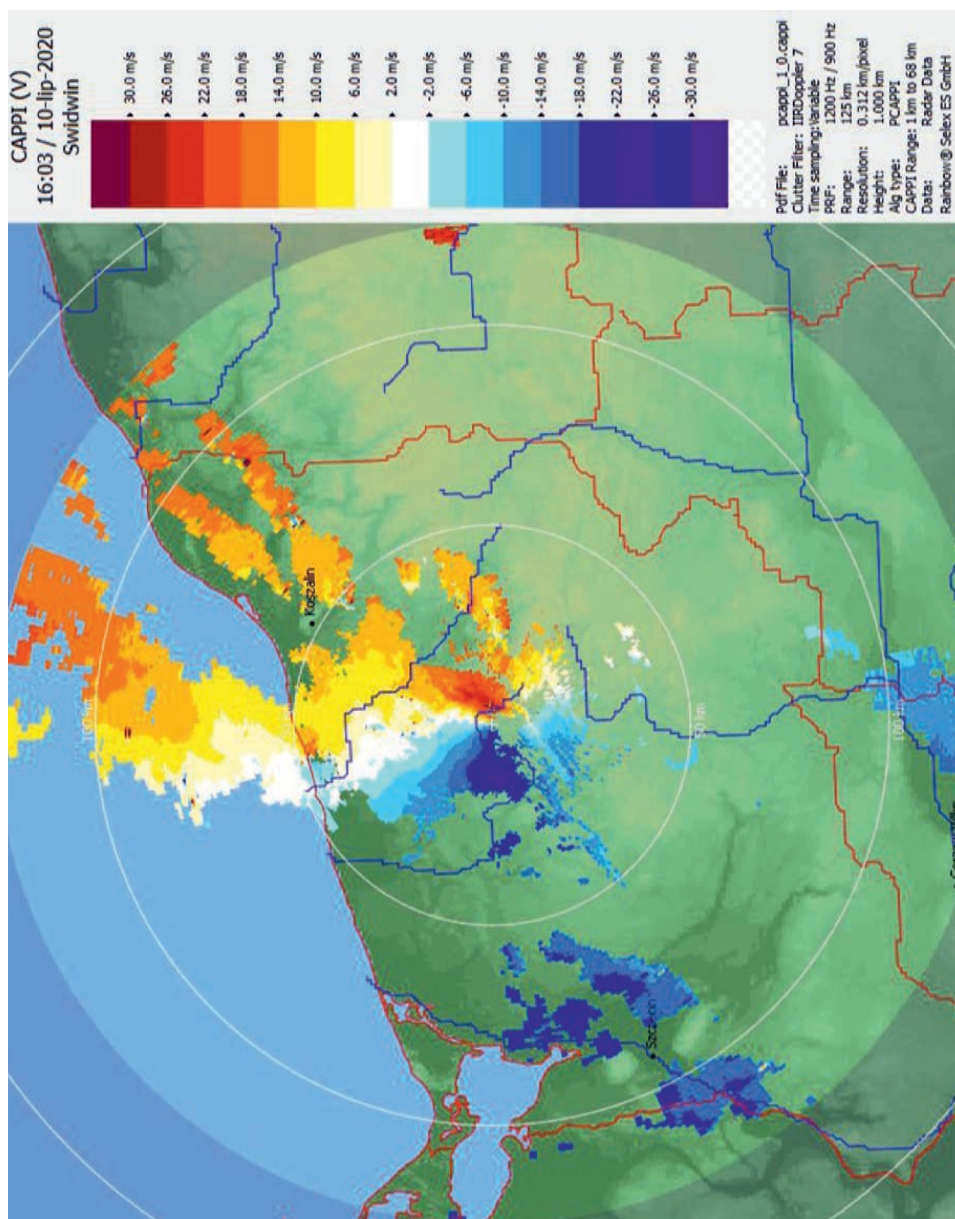
Fig. 8. Destroyed mobile home after a tornado. Own artwork



Ryc. 9. Zniszczona skrzynka elektryczna oraz część ogrodzenia po przejściu tornada. Grafika własna

Fig. 9. Destroyed electrical box and part of fence after a tornado. Own artwork

W celu przedstawienia powiązania trąby powietrznej z mezocyklonem ukazano zobrazenia radarowe prędkości wiatru radialnego na produkcie radarowym PCAPPI (ryc. 10). W miejscu wystąpienia trąby powietrznej widoczny jest mezocyklon, wskazujący na rotację w obrębie burzy. Na przekroju pionowym wystąpił obszar słabego echa radarowego (ang. *bounded weak echo region*, w skrócie BWER) i towarzyszący mu nawis odbiciowości (ang. *overhang*; ryc. 11).

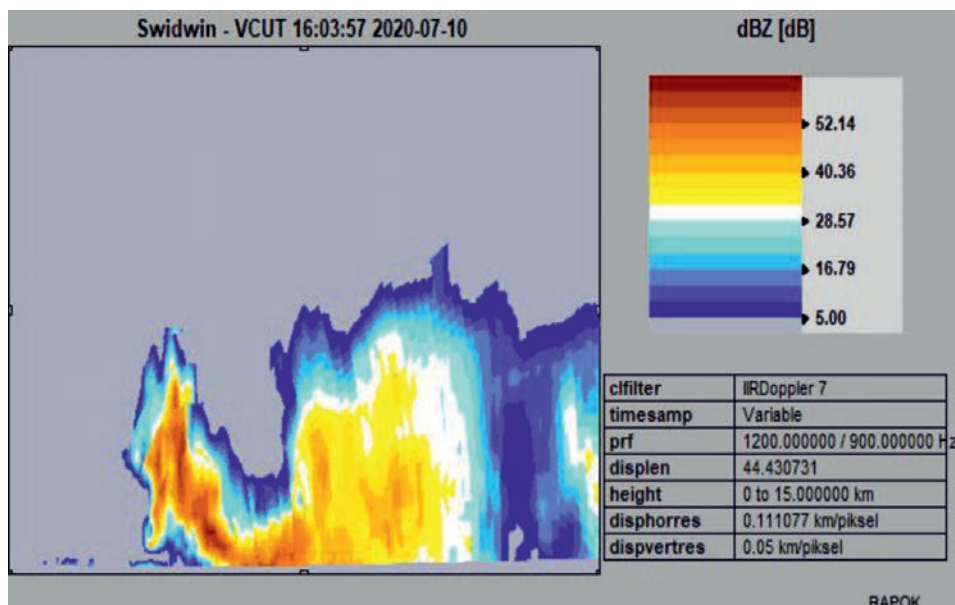


Ryc. 10. Pomiar prędkości wiatru radialnego (V) na produkcie radarowym PCAPPI (z wysokości 1 km nad poziomem gruntu) z godz. 16:03 UTC, 10 lipca 2020 roku

Fig. 10. Measurement of radial wind speed (V) on PCAPPI radar product (from 1 km above ground level) from 16H03 UTC, 10 July 2020.

Źródło danych/Source of data: IMGW-PIB.





Ryc. 11. Przekrój pionowy przez superkomórkę burzową z godz.16:03 UTC, 10 lipca 2020 roku

Fig. 11. Vertical cross-section through the storm supercell at 16h03 UTC, 10 July 2020

Źródło danych/Source of data: IMGW-PIB.

### 3. Meteorologiczne uwarunkowania rozwoju superkomórek burzowych

Energia potencjalna dostępna konwekcyjnie dla cząstki powietrza liczonej z warstwy 0–1 km (MLCAPE) osiągnęła o godz. 12 UTC w Legionowie  $364 \text{ J kg}^{-1}$ . Uskok prędkościowy wiatru z warstwy 0–6 km nad poziomem gruntu przyjął wartość  $19 \text{ m s}^{-1}$ . Pionowe ścinanie wiatru z warstwy 0–1 km nad poziomem gruntu (LLS) wyniosło  $8 \text{ m s}^{-1}$ .

Sondaż aerologiczny z Legionowa o godz. 12 UTC wskazał na SRH z warstwy 0–3 km osiągające  $108 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ . Należy zwrócić uwagę na skrzyżność wiatru z warstwy 0–1 km, która wyniosła w omawianym miejscu  $81 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ .

Dane z sondażu aerologicznego wskazały na umiarkowaną zawartość pary wodnej, która została określona między innymi przez stosunek zmieszania pary wodnej wynoszący  $10,7 \text{ g kg}^{-1}$ . Poziom kondensacji wymuszonej osiągnął 1391 m.

Przydatne dla ustalenia warunków synoptycznych przy wybrzeżu są pomiary pionowego profilu atmosfery wykonane przez sondaż aerologiczny w Greifswaldzie (około 150 km na północny zachód od miejsca zejścia trąby powietrznej) o godz. 12 UTC. Dane wskazują na wystąpienie silniejszego, pionowego ścinania

wiatru niż miało to miejsce w Legionowie (tab. 1). Uskok prędkościowy wiatru z warstwy 0–6 km nad powierzchnią Ziemi wyniósł  $30 \text{ m s}^{-1}$ , natomiast LLS osiągnął  $15 \text{ m s}^{-1}$ . Na uwagę zasługują bardzo wysokie wskaźniki skrętności wiatru:  $220 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  dla poziomu 0–3 km i  $208 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  dla warstwy 0–1 km, które mogły wpłynąć na mezocyklon, a tym samym ewolucję trąby powietrznej. Dla tornadowych superkomórek kluczowe są dwa parametry: koncentracja pary wodnej w warstwie granicznej oraz LLS; to one odróżniają często środowisko, w którym powstają lub nie tworzą się tornada (Markowski i Richardson 2009). W Legionowie poziom kondensacji wymuszonej (MLLCL), kluczowy czynnik do powstawania trąb powietrznych, był o 927 m wyższy WiWż w Greifswaldzie. Niższa wysokość LCL, szczególnie poniżej 1300 m, jest typowa dla rozwoju tornada (Thompson i in. 2003; Craven i Brooks 2004; Davies 2006).

Tab. 1. Wartości parametrów konwekcyjnych z sondażów aerologicznych: Legionowo oraz Greifswald z 10 lipca 2020 r., godz. 12 UTC

Tab. 1. Values of convective parameters from aerological surveys: Legionowo and Greifswald from 10 July 2020, 12 UTC

Lokalizacja/ parametr	MLCAPE	SHEAR 0–6 km	SHEAR 0–1 km	SRH 0–3 km	SRH 0–1 km	MLLCL	ML MIXING RATIO
Legionowo	364 J kg <sup>-1</sup>	19 m s <sup>-1</sup>	8 m s <sup>-1</sup>	108 m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	85 m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	1391 m	10,7 g kg <sup>-1</sup>
Greifswald	0 J kg <sup>-1</sup>	30 m s <sup>-1</sup>	15 m s <sup>-1</sup>	220 m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	208 m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	464 m	10 g kg <sup>-1</sup>

Źródło danych/Source of data: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Należy zwrócić uwagę na dane termiczno-wilgotnościowe dla Dźwirzyna (stacji pomiarowej położonej najbliżej zejścia trąby powietrznej) i porównać je z pomiarami dokonanyymi na stacji synoptycznej w Mławie. O godz. 15 UTC na stacji nadmorskiej temperatura powietrza była niższa niż w Mławie. Punkt rosy okazał się jednak wyższy i wilgotność względna powietrza przyjmowała znacznie wyższe wartości niż w Mławie. Świadczyć może to o tym, że masa powietrza w Dźwirzynie była wilgotniejsza, „bliższa” do osiągnięcia stanu nasycenia. Dane tabelaryczne wskazujące na wartości temperatury oraz wilgotność powietrza przedstawiono w tab. 2.

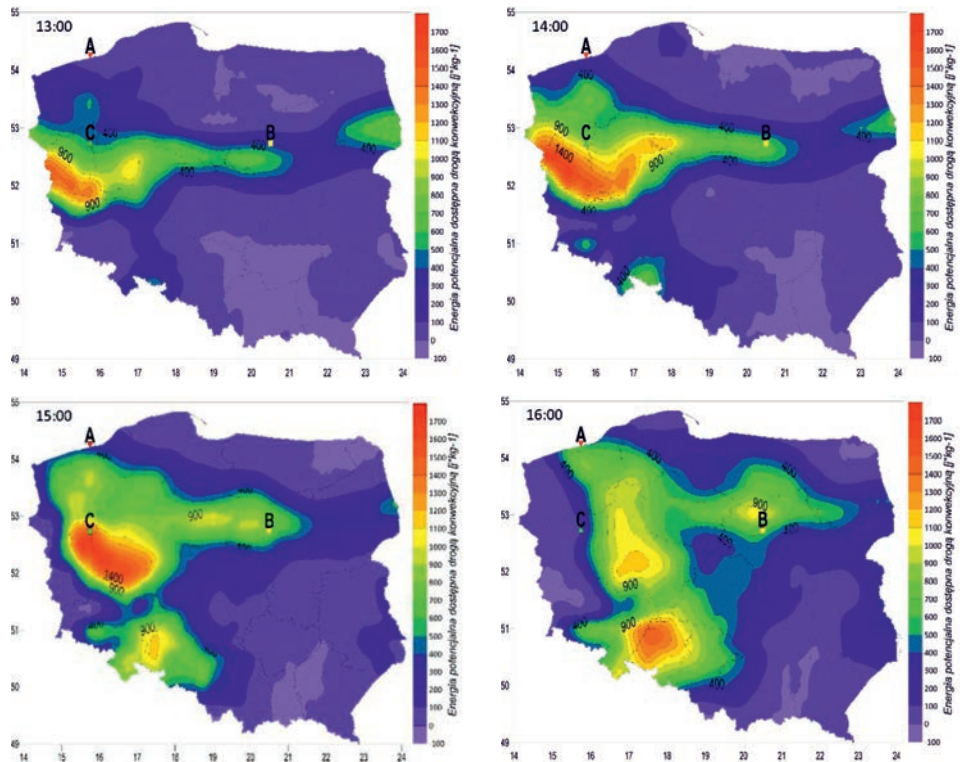
Tab. 2. Porównanie warunków termiczno-wilgotnościowych na stacjach Mława i Dźwirzyno w godz. 15/16 UTC

Tab. 2. Comparison of thermal and humidity conditions at Mława and Dźwirzyno stations at 15/16 UTC

Stacje	Temperatura powietrza o godz. 15/16 UTC	Temperatura punktu rosy o godz. 15/16 UTC	Wilgotność względna o godz. 15/16 UTC
Mława	26°C / 24°C	16°C / 18°C	56% / 71%
Dźwirzyno	20°C / 17°C	18°C / 15°C	85% / 90%

Źródło danych/Source of data: IMGW–PIB.

Ze względu na dalekie umiejscowienie radiosondażu od mezocyklonalnego tornada oraz niewystarczającą rozdzielczość czasową danych z sondaży aeorologicznych wykorzystano reanalizy ERA5. Dały one większe możliwości oszacowania wskaźników konwekcyjnych dla miejsca i czasu pojawienia się gwałtownych zjawisk atmosferycznych. W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na przemieszczanie się „strefy” podwyższonej chwiejności termodynamicznej od zachodniej ku centralnej części kraju w godzinach popołudniowych (ryc. 12).



Ryc. 12. Wizualizacja przestrzenna energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie (CAPE) występującej na obszarze Polski w godz. 13, 14, 15, 16 UTC, dnia 10 lipca 2020 r. dokonana na podstawie danych reanalizy ERA5

Fig. 12. Spatial visualisation of convectively available potential energy (CAPE) in Poland at 13h:00, 14:00, 15:00, 16:00 UTC on 10 July 2020, based on ERA5 reanalysis data

Reanalizy pozwalają na sformułowanie wniosku, że pierwsza z omawianych burz przechodząca nad woj. lubuskim rozwijała się przy znacznie większych wartościach wskaźników MLCAPE, MUCAPE, SBCAPE niż superkomórka burzowa znajdująca się na Mazowszu czy przy wybrzeżu (tab. 3, tab. 4). W okolicy Drezdenka (52,75°N, 15,75°E) o godz. 14 UTC odnotowano MLCAPE o warto-

ści  $705,3 \text{ J kg}^{-1}$  przy uskoku wiatru z warstwy 0–6 km wynoszącym  $27,6 \text{ m s}^{-1}$  (tab. 4). W okolicy Ustronia Morskiego ( $54,25^\circ\text{N}$ ,  $15,75^\circ\text{E}$ ) o godz. 16 UTC wskaźnik MLCAPE osiągnął  $490,9 \text{ J kg}^{-1}$ , natomiast uskok wiatru z warstwy 0–6 km  $28,2 \text{ m s}^{-1}$  (tab. 3). Należy zaznaczyć, że sygnatura radarowa *hook echo* na Mazowszu rozwinęła się przy podobnym wskaźniku MLCAPE co trąba powietrzna na wybrzeżu (niespełna  $500 \text{ J kg}^{-1}$ ). Znacznie wyższy był tam natomiast wskaźnik MUCAPE i SBCAPE (o prawie  $500 \text{ J kg}^{-1}$ ). Potwierdza to wyższy niedosyt wilgotności powietrza niż w miejscu rozwoju tornada.

Tab. 3. Wartości parametrów MLCAPE, SBCAPE, MLCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ] oraz uskoku wiatru dla warstwy 0–6 km [ $\text{m s}^{-1}$ ] pochodzące z reanalizy ERA5 dla określonych współrzędnych geograficznych (okolice Ustronia Morskiego, góra; okolice Ciechanowa, dół) na 10 lipca 2020 r., godz. 16 UTC

Tab. 3. Values of MLCAPE, SBCAPE, MLCAPE parameters [ $\text{J kg}^{-1}$ ] and wind uplift for the 0-6 km layer [ $\text{m s}^{-1}$ ] derived from ERA5 reanalysis for specific geographical coordinates (vicinity of Ustronie Morskie, top; vicinity of Ciechanów, bottom) as of 10 July 2020, 16 UTC

Lokalizacja/parametr	MUCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	SBCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	MLCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	Shear 0–6 km [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$54,25^\circ\text{N}$ , $15,75^\circ\text{E}$	566,8	566,8	490,9	28,2
$52,75^\circ\text{N}$ , $20,5^\circ\text{E}$	1073,4	1073,4	475,6	22,5

Źródło danych/Source of data: [http://www.rawinsonde.com/ERA5\\_Europe/](http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe/).

Tab. 4. Wartości parametrów MLCAPE, SBCAPE, MLCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ] oraz uskoku wiatru [ $\text{m s}^{-1}$ ] dla warstwy 0–6 km pochodzące z reanalizy ERA5 dla okolicy Drezdenka na godz. 14 UTC, 10 lipca 2020 roku

Tab. 4. Values of MLCAPE, SBCAPE, MLCAPE parameters [ $\text{J kg}^{-1}$ ] and wind uplift [ $\text{m s}^{-1}$ ] for the 0-6 km layer from the ERA5 reanalysis for the vicinity of Drezdenko at 14 UTC, 10 July 2020

Lokalizacja/parametr	MUCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	SBCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	MLCAPE [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	Shear 0–6 km [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$52,75^\circ\text{N}$ , $15,75^\circ\text{E}$	1225,7	1225,7	705,3	27,6

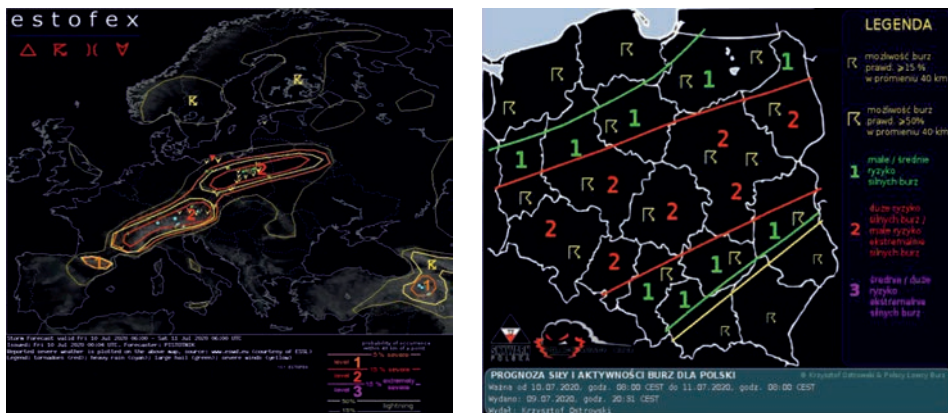
Źródło danych/Source of data: [http://www.rawinsonde.com/ERA5\\_Europe/](http://www.rawinsonde.com/ERA5_Europe/).

Na podstawie wyżej wymienionych wartości parametrów konwekcyjnych można stwierdzić, że trąba powietrzna miała miejsce w środowisku silnego ścinania i wysokiej skrętności wiatru oraz niskiej chwiejności termodynamicznej przy jednocześnie obecnej dużej zawartości wilgoci w przyziemnej części troposfery. Sygnatura radarowa *hook echo* na Mazowszu rozwinęła się przy podobnym wskaźniku MLCAPE co trąba powietrzna na wybrzeżu. Dane z reanalizy ERA 5 wskazują jednak na wyższy niedosyt wilgotności powietrza w okolicy Ciechanowa. Ponadto warunki kinematyczne do rozwoju trąby powietrznej były znacznie bardziej korzystne na wybrzeżu niż na Mazowszu.

Sąsiedztwo pofalowanego frontu atmosferycznego przyczyniło się do wystąpienia silniejszych ruchów wznoszących powietrza mogących wpłynąć na rozwój zarówno burzy superkomórkowej, jak i tornada. Matczak (2020) pisze, że wśród najbardziej sprzyjających sytuacji synoptycznych dla rozwoju superkomórek burzowych wyróżnia się zafalowania na frontach atmosferycznych i tworzenie się lokalnych ośrodków niskiego ciśnienia wspomagających konwekcję. Do podobnych wniosków w stosunku do tornad w Polsce dochodzi Walczakiewicz (2020).

#### 4. Prognozy konwekcyjne i ich weryfikacja

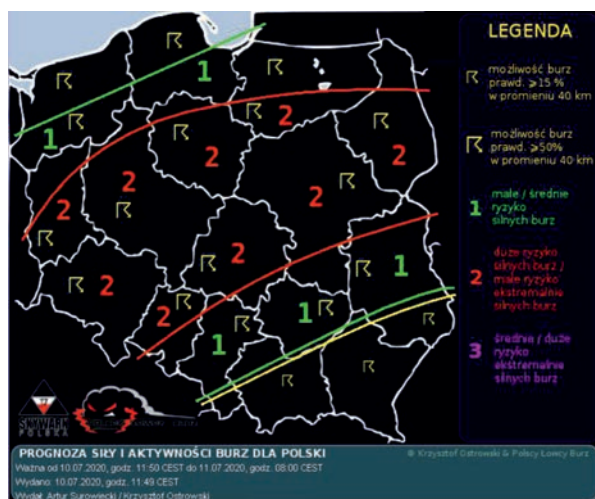
Mapy określające prawdopodobieństwo i przewidywaną aktywność zjawisk konwekcyjnych wskazywały na wystąpienie najkorzystniejszych warunków do rozwoju silnych burz w południowo-zachodniej, centralnej, wschodniej i częściowo północno-wschodniej części kraju (ryc. 13, ryc. 14). Źródła prognoz, jakimi są wyliczenia numerycznych modeli prognostycznych, nie oszacowały wystarczająco dobrze chwiejności atmosferycznej, aby wskazać możliwość wystąpienia tornada w północno-zachodniej części kraju. W związku z tym superkomórka burzowa na wybrzeżu oraz związana z nią trąba powietrzna była trudna do zaprognozowania. Prognozowanie burz w środowisku *HIGH SHEAR–LOW CAPE* stanowi problematyczne zagadnienie zarówno dla naukowców, jak i synoptyków (Sherburn i Parker 2014; Dean i Schneider 2012; Gatzen i in. 2011).



Ryc. 13. Prognoza konwekcyjna dwóch instytucji naukowych: ESTOFEX oraz Skywarn Polska na 10 lipca 2020 roku

Fig. 13. Convective forecast from two scientific institutions: ESTOFEX and Skywarn Poland for 10 July 2020

Źródła/Sources: 1) <https://www.estofex.org/>, 2) <https://lowcyburz.pl/>.



Ryc. 14. Aktualizacja prognozy konwekcyjnej na 10.07.2020 roku

Fig. 14. Convective forecast update for 10 July 2020

Źródło/Source: <https://lowcyburz.pl/>.

## DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Choć na obszarze Polski 10 lipca 2020 r. doszło do rozwoju kilku przypadków silnych burz, to były one powiązane z odmiennymi warunkami atmosferycznymi. Trąba powietrzna, która wystąpiła w Ustroniu Morskim, powstała na froncie po-falowanym, natomiast superkomórka rozwijająca się na Ziemi Lubuskiej oraz na Mazowszu na froncie chłodnym. Chwiejność atmosferyczna najwyższe wartości osiągnęła w miejscach gradobić oraz niszczących porywów wiatru w woj. lubuskim. Zgodnie z dotychczasową wiedzą, połączenie parametrów CAPE oraz DLS było dobrym wskaźnikiem odzwierciedlającym miejsce największego zagrożenia opadami gradu.

Przekroje pionowe odbiciowości radarowej (VCUT) wskazały na obecność obszaru słabego echa (ang. *bounded weak echo region*, BWER) w obrębie burzy generującej tornado. Według Pilorza (2014), sygnatura BWER jest bezpośrednim rezultatem występowania silnego prądu wstępującego, szczególnym zaś rodzajem silnego prądu wstępującego jest mezocyklon, będący zarazem wyznacznikiem superkomórek.

Choć sondaż aeologiczny z Grefiswaldu z godz. 12 UTC wskazywał na brak energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie i w związku z tym niesprzyjające warunki do rozwoju tornada, to wizualizacje wykonane na podstawie reanalizy ERA5 przedstawiły napływ bardziej chwiejnego powietrza w godzinach późniejszych. Za pomocą reanaliz meteorologicznych możliwe było wyznaczenie do-

kładniejszych wartości energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie dla miejsca i czasu, w jakim rozwinęła się trąba powietrzna. Silne, pionowe uskoki wiatru i duża zawartość wilgoci w przyziemnej części troposfery mogły odegrać ważną rolę w procesie intensyfikacji trąby powietrznej. W miejscu wystąpienia sygnatury radarowej *hook echo* na Mazowszu tornado nie pojawiło się. Wskaźniki kinematyczne (szczególnie dla warstwy 0–1 km) osiągały mniejsze wartości niż w miejscu tornada, wyższy był także poziom kondensacji pary wodnej.

Numeryczne modele prognostyczne oraz tworzone na ich podstawie prognozy konwekcyjne wskazywały, że prawdopodobieństwo rozwoju trąby powietrznej na wybrzeżu jest bardzo małe. Najsilniejsze burze niosące groźne, niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzkiego zjawiska wystąpić miały w południowo-zachodniej, centralnej, wschodniej i częściowo północno-wschodniej części kraju. Omówione dwie superkomórki burzowe przemieszczały się zgodnie z wersjami prognoz (ESTOFEX oraz Skywarn Polska) w pierwszym lub drugim stopniu zagrożenia. Tornado natomiast wystąpiło poza tym obszarem, w obrębie pofalowanego frontu atmosferycznego znajdującego się za frontem chłodnym.

Jak pisze Taszarek (2016), „nie możemy zapobiegać występowaniu silnych burz ani ich kontrolować, ale ponieważ życie ludzkie jest najważniejsze, powinniśmy zrobić wszystko, aby informować społeczeństwo o możliwym zagrożeniu”. Warunki typu *HIGH SHEAR–LOW CAPE* nie są charakterystyczne dla letniej pory roku. Według autora, jeśli pojawią się one latem i przyczynią się do rozwoju silnych burz w kraju, warto poświęcić im większą uwagę w przyszłych badaniach naukowych. Analiza przypadku z 10 lipca 2020 r. wskazuje, że warunki *HIGH SHEAR–LOW CAPE* stanowią problematyczne zagadnienie dla prognostów pogody, także na obszarze Polski.

### Podziękowania

Chciałbym serdecznie podziękować Panu dr. Bartoszowi Czerneckiemu za konsultacje i cenne wskazówki pomocne przy realizacji pracy. Dziękuję także Panu mgr. Patrykowi Matczakowi za udostępnienie fotografii przedstawiającej szkody po gwałtownych zjawiskach atmosferycznych. Dziękuję również Panu mgr. Krzysztofowi Piaseckiemu za udostępnienie danych o przekroju pionowym superkomórki burzowej.

### LITERATURA

- 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.
- Blumberg W.G., Halbert K.T., Supinie T.A., Marsh P.T., Thompson R.L., Hart J.A., 2017: *SHARPy: An Open Source Sounding Analysis Toolkit for the Atmospheric Sciences*. Bull. Amer. Meteor. Soc. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00309.1, in press.
- Brooks H.E., Doswell III C.A., Cooper J. 1994: *On the environments of tornadic and nontornadic mesocyclones*. Weather and forecasting, 9 (4), 606–618.

- Brooks H.E., Marsh P.T., Kowaleski A.M., Groenemeijer P., Thompson T.E., Schwartz C.S., Buckley D., 2011: *Evaluation of European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX) forecasts*. Atmospheric Research, 100 (4), 538–546.
- Bunkers M.J., Klimowski B.A., Zeitler J.W., 2002: *The importance of parcel choice and the measure of vertical wind shear in evaluating the convective environment*. 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., P8. 2.
- Coffer B.E., Taszarek M., Parker M.D., 2020: *Near-ground wind profiles of tornadic and non-tornadic environments in the United States and Europe from ERA5 reanalyses*. Weather and Forecasting, 35 (6), 2621–2638.
- Craven J.P., Brooks H.E., 2004: *Baseline climatology of sounding-derived parameters associated with deep moist convection*. Nat. Wea. Dig., 28, 13–24.
- Davies J.M., 2006: *Tornadoes in environments with small helicity and/or high LCL heights*. Weather and forecasting, 21 (4), 579–594.
- Dean A.R., Schneider R.S., 2012: *An examination of tornado environments, events, and impacts from 2003–2012*. In 26th Conf. on Severe Local Storms.
- Doswell III C.A., Weiss S.J., Johns R.H., 1993: *Tornado forecasting: A review. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, Geophys. Monogr, 79, 557–571.
- Doswell C.A., Burgess D.W., 1993: *Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models*. Geophysical Monograph – American Geophysical Union, 79, 161–161.
- Doswell III C.A., Brooks H.E., Dotzek N., 2009: *On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA*. Atmospheric Research, 93 (1–3), 554–563.
- Dotzek N., 2001: *Tornadoes in Germany*. Atmospheric Research, 56 (1–4), 233–251.
- Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A.M., 2009: *Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD*. Atmospheric Research, 93 (1–3), 575–586.
- Forbes G.S., 1981: *On the reliability of hook echoes as tornado indicators*. Monthly Weather Review, 109 (7), 1457–1466.
- Fujita T.T., 1978: *Manual of downburst identification for project NIMROD*. SMRP Res. Paper, 156, 104.
- Fujita T.T., 1971: *Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity*. Chicago: University of Chicago.
- Gatzen C., Púčik T., Ryva D., 2011: *Two cold – season derechoes in Europe*. Atmospheric Research, 100 (4), 740–748.
- Groenemeijer P.H., Van Delden A., 2007: *Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands*. Atmospheric Research, 83 (2–4), 473–487.
- Groenemeijer P., Púčik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M., Sausen R., 2017: *Severe convective storms in Europe: Ten years of research and education at the European Severe Storms Laboratory*. Bulletin of the American Meteorological Society, 98 (12), 2641–2651.
- 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 (4), 479–488.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Simmons A., 2020: *The ERA5 global reanalysis*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146 (730), 1999–2049.
- Kolendowicz L., Taszarek M., Czernecki B., 2017: *Atmospheric circulation and sounding-derived parameters associated with thunderstorm occurrence in Central Europe*. Atmospheric Research, 191, 101–114.



- Kowaleski A., Brooks H.E., Doswell C., 2010, January: *Verification of ESTOFEX Lightning and Severe Weather Forecasts*. In 9th Annual Student Conference.
- Markowski P.M., Richardson Y.P., 2009: *Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research*. Atmospheric Research, 93 (1–3), 3–10.
- Matczak P., 2020: *Warunki synoptyczne sprzyjające rozwojowi superkomórek burzowych w latach 2010–2019*.
- Moller A.R., Doswell III C.A., Foster M.P., Woodall G.R., 1994: *The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures*. Weather and Forecasting, 9 (3), 327–347.
- Parfiniewicz J., 2009: *Tornado w rejonie Częstochowy – 20 lipca 2007, cz. 1: Analiza synoptyczna*. Przegląd Geofizyczny, 54, 3–4.
- Pilgij N., Taszarek M., Pajurek Ł., Kryza M., 2019: *High-resolution simulation of an isolated tornadic supercell in Poland on 20 June 2016*. Atmospheric Research, 218, 145–159.
- Pilorz W., 2014: *Radarowa detekcja superkomórek burzowych w Polsce*. Teledetekcja Środowiska, 51.
- Pilorz W., Laskowski I., *Obrazy radarowe źródłem informacji o zagrożeniach meteorologicznych*.
- Popławska J., 2014: *Tornado superkomórkowe w Polsce – studium przypadku z 15 sierpnia 2008*. Prace i Studia Geograficzne, 56.
- Poręba S., Ustrnul Z., 2020: *Forecasting experiences associated with supercells over South-Western Poland on July 7, 2017*. Atmospheric Research, 232, 104681.
- Půčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M., 2015: *Proximity soundings of severe and non-severe thunderstorms in central Europe*. Monthly Weather Review, 143 (12), 4805–4821.
- Rasmussen E.N., 2003: *Refined supercell and tornado forecast parameters*. Weather and Forecasting, 18 (3), 530–535.
- 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.
- Schneider R.S., Dean A.R., 2008, October: *A comprehensive 5-year severe storm environment climatology for the continental United States*. In Preprints, 24th Conf. on Severe Local Storms, Savannah, GA, Amer. Meteor. Soc. A (Vol. 16).
- Sherburn K.D., Parker M.D., 2014: *Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments*. Weather and Forecasting, 29 (4), 854–877.
- Taszarek M., 2013: *Możliwości prognozowania trąb powietrznych w Polsce = Forecasting the possible emergence of tornadoes in Poland*. Przegląd Geograficzny, 85 (3), 353–371
- Taszarek M., 2016: *Charakterystyka występowania burz oraz trąb powietrznych na obszarze Polski*.
- Taszarek M., Brooks H.E., 2015: *Tornado climatology of Poland*. Monthly Weather Review, 143 (3), 702–717.
- Taszarek M., Kolendowicz L., 2013: *Sounding – derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and Universal Tornado Index*. Atmospheric Research, 134, 186–197.
- Taszarek M., Suwała K., 2015: *Large hail in Poland in 2012*. Quaestiones Geographicae, 34 (1), 75–84.
- Taszarek M., Allen J.T., Půčik T., Hoogewind K.A., Brooks H.E., 2020: *Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes*. Journal of Climate, 33 (23), 10 263–10 286.
- Taszarek M., Allen J., Půčik T., Groenemeijer P., Czernecki B., Kolendowicz L., Schulz W., 2019: *A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources*. Journal of Climate, 32 (6), 1813–1837.

- Taszarek M., Czernecki B., Walczakiewicz S., Mazur A., Kolendowicz L., 2016: *An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation*. Atmospheric Research, 178, 367–379.
- Taszarek M., Pilgus N., Orlikowski J., Surowiecki A., Walczakiewicz S., Pilorz W., Pórolniczak M., 2019: *Derecho evolving from a mesocyclone – A study of 11 August 2017 severe weather outbreak in Poland: Event analysis and high-resolution simulation*. Monthly Weather Review, 147 (6), 2283–2306.
- Thompson R.L., Mead C.M., Edwards R., 2007: *Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments*. Weather and Forecasting, 22 (1), 102–115.
- Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., Elmore K.L., Markowski P., 2003: *Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle*. Weather and Forecasting, 18, 1243–1261.
- Walczakiewicz S., 2020: *Regiony trąb powietrznych w Polsce – meteorologiczne uwarunkowania oraz rozkład przestrzenny i czasowy*. Uniwersytet Szczeciński, Szczecin.
- 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.

#### Źródła internetowe

- [https://lowcyburz.pl/download/przewodnik\\_po\\_prognozach\\_konwekcyjnych.pdf](https://lowcyburz.pl/download/przewodnik_po_prognozach_konwekcyjnych.pdf) [dostęp: 7.06.2022].
- <https://eswd.eu/> [dostęp: 7.06.2022].
- [https://www.eswd.eu/docs/ESWD\\_criteria\\_en.pdf](https://www.eswd.eu/docs/ESWD_criteria_en.pdf) [dostęp: 7.06.2022].