



Wojciech Nadzialek

Szkoła Doktorska Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, Zakład Geomorfologii i Geoarcheologii

E-mail: wojtek.nadzialek@poczta.onet.pl

Burza superkomórkowa z 13/14 lipca 2024 r. jako przykład ekstremalnych zjawisk pogodowych w województwie świętokrzyskim

Supercell storm from July 13/14, 2024 as an example of extreme weather events in the Świętokrzyskie region

Zarys treści

Postępujące zmiany klimatyczne są przyczyną coraz częstszego występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych. Celem pracy było rozpoznanie przyczyn powstania i skutków burzy, która przeszła nocą z 13 na 14 lipca 2024 r. przez obszar województwa świętokrzyskiego, jako przykładu ekstremalnego zdarzenia pogodowego. Burza ta rozwinęła się na chłodnym froncie atmosferycznym, który wypierał masy zwrotnikowe. Najwięcej szkód powstało w zachodniej oraz centralnej części województwa świętokrzyskiego, a łączna długość szlaku zniszczeń wyniosła około 110 km.

Słowa kluczowe Superkomórka burzowa, ekstremalne zjawiska pogodowe, pogoda, województwo świętokrzyskie.

Abstract

Progressive climate change is causing more and more frequent occurrence of extreme weather events. The aim of this study was to identify the causes and consequences of a thunderstorm that passed through the area of the Świętokrzyskie Voivodeship on the night of 13 to 14 July 2024, as an example of an extreme weather event. This storm developed on a cool atmospheric front that displaced tropical masses. Most damage occurred in the western and central parts of the Świętokrzyskie Voivodeship, with a total damage path of approximately 110 km.

Keywords

Supercell storm, extreme weather phenomena, weather, Świętokrzyskie voivodeship.

1. Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne występowały w czasie całej historii Ziemi, jednakże po małej epoce lodowej odnotowano znaczne ich przyśpieszenie, tzw. globalne ocieplenie (Diemientiew 2018). Szczególnie widoczne jest to w przypadku takich elementów pogody, jak temperatura powietrza czy opady atmosferyczne (Tsermagas i Grabowska 2020). Wyraźne ocieplenie klimatu Ziemi obserwowane jest od początku okresu industrialnego. Wobec przyjętego okresu referencyjnego 1850–1900, w latach 2011–2020 odnotowano wzrost średniej globalnej temperatury o około 1,09°C (IPCC 2021). Wzrost średniej temperatury powietrza obserwowany jest także w Polsce, w latach 1901–2000 temperatura wzrastała średnio o 0,0089°C na rok, co w okresie stuletnim doprowadziło do ocieplenia o około 0,9°C (Kozuchowski 2011). Do końca XXI wieku średnia roczna temperatura w Polsce może wzrosnąć o około 3,0–3,5°C (Graczyk 2013).

Jednym ze skutków zmian klimatycznych jest coraz częstsze występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat najszybszy wzrost naturalnych zdarzeń ekstremalnych, powodują-

cych straty, odnotowano kolejno w Azji, Australii i Oceanii oraz Ameryce Północnej, natomiast najmniejszy w Europie i Ameryce Południowej (Hov in. 2013). Ich występowanie jest jednak często zależne od pory roku. W Stanach Zjednoczonych w ciągu ostatnich 41 lat obserwuje się wzrost częstotliwości występowania wysokich temperatur: 2,1-krotny we wszystkich miesiącach, z 2,6-krotnym wzrostem w miesiącach od lipca do października. Ryzyko ekstremalnych opadów deszczu wzrasta 1,4-krotnie w grudniu i styczniu, ale spada o 22% w miesiącach wiosennych i letnich (Shenoy i in. 2022). Wzrost ekstremalnych opadów deszczu prognozowany jest także w północnej oraz południowej Azji, co może zwiększyć powierzchnię obszarów zagrożonych powodzią. Z kolei spadek opadów i coraz częstsze susze mogą mieć miejsce w Azji Centralnej (IPCC 2018). Obszarami mocno narażonymi na zmiany klimatyczne i związanymi z nimi anomaliami są obszary górskie. Nadal nie jest pewne, czy regiony górskie ocieplają się w innym tempie niż reszta globalnej powierzchni lądowej, czy też wrażliwość na ocieplenie w oparciu o wysokość jest w górach powszechna (Rangwala i Miller 2012). Według części analiz ocieplenie klimatu doprowadzi do wzrostu energii potencjalnej dostępnej



konwekcyjnie (ang. *convective available potential energy*, CAPE), będzie to skutek wzrostu temperatury oraz wilgotności. Jednocześnie zmniejszeniu ulegnie uskok prędkości wiatru przez spadek gradientu termicznego między równikiem a biegunem. Wzrost wartości CAPE sprzyjał będzie występowaniu groźnych burz, choć pogorszenie warunków kinematycznych może jednocześnie negatywnie wpłynąć na takie zjawiska, jak tornada, lecz potwierdzenie tej hipotezy wymaga dalszych badań (Brooks 2013). Najwyższe wartości energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie występują w strefie międzyzwrotnikowej, natomiast najsilniejsze uskoki prędkości wiatru w średnich szerokościach geograficznych. Przy silnych uskokach prędkości niepotrzebne są duże wartości CAPE do powstania zjawisk ekstremalnych, z tego powodu najsilniejsze burze występują w strefie umiarkowanej (Taszarek i in. 2021a). Obserwuje się coraz lepsze środowisko rozwoju burz nad Europą Północną, Centralną oraz Południową z racji wzrostu wilgotności na niskim poziomie. Nad Północno-Zachodnią Europą zaobserwowano również umiarkowany wzrost pionowego ścinania wiatru i względnej skrętności burzowej. Podobna sytuacja ma miejsce nad Wielkimi Równinami w Stanach Zjednoczonych (Taszarek i in. 2021b). Prawdopodobne jest to, że skutkiem występowania cieplejszego klimatu będzie zmniejszenie liczby burz, przy jednoczesnym zwiększeniu ich siły. Ilość wyładowań atmosferycznych może zwiększać się o 10% na każdy stopień ocieplenia (Price 2009).

Zmiany klimatyczne przyczyniają się więc do występowania ekstremów pogodowych. Nie istnieje jedna konkretna definicja ekstremalnych zjawisk pogodowych. Według Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC 2007) są to zdarzenia rzadkie w danym miejscu i porze roku, a ich prawdopodobieństwo jest nie większe niż 10%. Według Lorenc i in. (2012) są to zjawiska, które po uzyskanej w sposób empiryczny wartości krytycznej, widoczne są niszczycielskie skutki danego zjawiska, zagrażające ludności i infrastrukturze obszaru, na którym wystąpiło. Wskazuje się również, że ekstremalne zdarzenia pogodowe mogą być wyznaczane na podstawie właściwego dla danego miejsca rozkładu prawdopodobieństwa (Miętus 2014). Takie zjawiska występują w wielu regionach, również w Polsce, głównie dzięki położeniu naszego kraju w strefie klimatu umiarkowanego (Ustrnul i in. 2014).

Za ekstremalne zdarzenia pogodowe w Polsce można uznać, np. niszczycielskie zjawiska burzowe. W wieloleciu 1949–1998 średnio w Polsce odnotowywano około 24 dni z burzą, przy czym w Tatrach oraz południowo-wschodniej części kraju liczba ta wzrasta do 33 (Bielec-Bąkowska 2002). W latach 1949–2006 liczba dni z burzą w Polsce nie uległa większym zmianom, około 97% wszystkich dni burzowych występowało w okresie od kwietnia do września, przy czym najwięcej zjawisk miało miejsce w lipcu oraz czerwcu (Bielec-Bąkowska 2013). Dość charakterystyczną cechą rozkładu przestrzennego burz w Polsce jest wzrost ich częstości w kierunku z północy na południe (Grabowska 2014). Najwięcej burz występuje podczas napływu mas powietrza z południa oraz południowo-wschodu (Bielec-

-Bąkowska 2002). Każdego roku w Polsce występuje około 360 000 wyładowań atmosferycznych, najwięcej uderzeń piorunów ma miejsce w pasie od Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej po Pojezierze Mazurskie (Taszarek 2016). W Polsce najkorzystniejsze warunki do powstania groźnych burz są wtedy, gdy jednocześnie występuje spora chwiejność (wysokie wartości CAPE) oraz silne pionowe uskoki prędkości wiatru. Często przy napływie masy zwrotnikowo-morskiej dochodzi do sytuacji, gdy występuje znaczna chwiejność, lecz jednocześnie warunki kinematyczne są niesprzyjające. Dochodzi wtedy do rozwoju niemal stacjonarnych burz wewnątrzmasowych, a ich potencjał do organizowania się w groźne typy burz, takie jak superkomórki burzowe jest mocno ograniczony (Ostrowski i in. 2010).

Województwo świętokrzyskie należy do jednego z bardziej burzowych regionów kraju. Liczba dni z burzą w Kielcach oraz Sandomierzu wyniosła odpowiednio 26,4 oraz 24,0. Obszar ten zakwalifikowano do Regionu Nadwiślańskiego, który odznaczał się dużym wzrostem dni burzowych w latach 1949–1998, co wyróżnia go na tle kraju (Bielec-Bąkowska 2002). Liczba dni z gradem w wieloleciu 1966–2010 osiągnęła wielkość 22, przy czym najwięcej przypada ich na maj oraz czerwiec (Suwała 2014). Występujące w regionie ekstrema pogodowe związane są głównie z temperaturami (Jarzyna 2016) oraz opadami (Jarzyna i in. 2017).

Superkomórki burzowe to najsilniejszy rodzaj burz, które potrafią generować niszczycielskie porywy wiatru, opady dużego gradu, nawalne opady deszczu czy też tornado (Moller i in. 1994). Powstają w obecności pionowych uskoku prędkości i kierunku wiatru (Popławska 2014a). Ten typ burzy wyróżnia obecność ciepłego, stałego i co najważniejsze, rotującego prądu wstępującego określanego mianem mezocyklonu (Weisman i Klemp 1984). Na skutek oddziaływania mezocyklonu z przednim prądem zstępującym (ang. *forward flank downdraft*) i tylnym prądem zstępującym (ang. *rear flank downdraft*), tworzy się charakterystyczna dla tej burzy formacja chmurowa określana jako chmura stropowa (rys. 1). Przy odpowiednio niskim poziomie kondensacji dochodzi do rozwoju trąby powietrznej (Leziak 2015). Z prądem wstępującym w superkomórce związane jest zjawisko *overshooting top*, czyli kopuły znajdującej się nad kowadłem chmury burzowej (Skywarn Polska). Silny prąd wstępujący w superkomórkach burzowych powstały przy obecności znaczących pionowych uskoku prędkości wiatru jest powodem tworzenia się dużych gradzin wewnątrz chmury burzowej (Suwała 2014). Wielkość gradu może osiągać czasem kilkanaście centymetrów. Dość charakterystycznym zjawiskiem dla tego typu burz są także gwałtowne prądy zstępujące (ang. *downburst*), czyli strumień opadającego zimnego powietrza zdolny do generowania niszczycielskich porywów wiatru (Fujita 1978). Ze względu na obejmowany przez to zjawisko obszar, dzieli się je na lokalne, z zasięgiem do 4 km (ang. *microburst*) oraz rozległe, obejmujące obszar powyżej 4 km (ang. *macroburst*). Wynika z tego, że mogą one być charakterystyczne nawet dla niezbyt dużego terenu (Fujita 1981). Bardzo często silne porywy wiatru mają

miejsce za wałem szkwałowym (rys. 2), który stanowi widoczną granicę frontu szkwałowego. Superkomórki można traktować jako niewielkie ośrodki niskiego ciśnienia z systemem tzw. pseudofrontów: dwa chłodne pseudofronty związane z przednim oraz tylnym prądem zstępującym i ciepły pseudofront ograniczający ciepłe i wilgotne powietrze napędzające mezocyklon. Wzdłuż linii oddzielającej tylny prąd wstępujący i mezocyklon dochodzi do rozwoju chmur konwekcyjnych. Jest to tzw. linia oskrzydłająca (ang. *flanking line*), kolejna formacja charakterystyczna dla superkomórki burzowej (Skywarn Polska).



Rys. 1. Chmura stropowa w dniu 23 lipca 2022 r. w okolicach Łagowa (woj. świętokrzyskie) (fot. W. Nadziałek)

Fig. 1. Wall cloud on July 23, 2022 near Łagów (Świętokrzyskie voivodeship) (photo by W. Nadziałek)



Rys. 2. Wał szkwałowy na czele superkomórki burzowej w dniu 12 lipca 2023 r. w okolicy Radomia (woj. mazowieckie) (fot. W. Nadziałek)

Fig. 2. Shelf cloud on the leading edge of supercell storm on July 12, 2023 near Radom (Masovian voivodeship) (photo by W. Nadziałek)

Jednym ze wskaźników, dzięki któremu można rozpoznać superkomórkę burzową jest jej odmienny tor ruchu względem pozostałych burz. Przyjmuje się, że cykloniczne superkomórki poruszają się o 20° w prawo i z prędkością równą 85% średniej prędkości wiatru, jeśli średnia prędkość wiatru przekracza 15 m/s. W innych przypadkach ich ruch odbywa się o około 30° w prawo, przy prędkości wynoszącej 75% średniej prędkości wiatru (Davies i Johns

1993). Ze względu na tor przemieszczania można podzielić je na dwa typy: lewoskrętne i prawoskrętne. Superkomórki lewoskrętne cechują się tym, że na półkuli północnej poruszają się na zachód (prawoskrętne na wschód) od kierunku wiatru wyznaczonego przez wektor wypadkowy kierunków wiatrów w płaszczyźnie poziomej (Leziak 2015).

Istnieje również podział tych burz ze względu na ilość generowanych przez nie opadów. Pierwszym typem są superkomórki niskoopadowe (*low precipitation*) cechujące się bardzo ograniczoną strefą opadu deszczu, czasem występują jednak intensywne opady gradu. To dość fotogeniczna odmiana tego typu burz. Superkomórki klasyczne posiadają wyraźnie oddzielone od siebie strefę opadu oraz prądu wstępującego. Natomiast typ wysokoopadowy (*high precipitation*) często generują nawalne opady deszczu mogące powodować powodzie błyskawiczne i silne prądy zstępujące (Szuster 2013).

Superkomórkę burzową wyróżnia się także po obecności charakterystycznych dla niej sygnatur radarowych. Najważniejszą z nich jest tzw. *hook echo*. Jak nazwa wskazuje przyjmuje ona formę haka. Powstaje w momencie, gdy opady powiązane z prądem wstępującym zostają zawinięte przez tylny prąd zstępujący. Wskazuje to na obecność mezocyklonu i potencjalne ryzyko trąby powietrznej (Leziak 2015). Nie zawsze jednak *hook echo* przybiera formę idealnego haka. Dlatego też wyróżniono inne odmiany tej sygnatury: *pendant*, *doughnut*, *bird* oraz *spiral* (Markowski 2002). Kolejną charakterystyczną cechą superkomórki na radarze jest BWER (ang. *Bounded Weak Echo Region*) – ograniczony obszar słabego echa. Sygnatura ta powstaje w momencie, gdy silny prąd wstępujący uniemożliwia dostanie się do jego centralnej części dużych gradzin, z racji na znaczną prędkość wiatru opady trwają krótko. Z tego wynika słabsza odbiciowość na obrazach radarowych. Obecność BWER zazwyczaj powiązana jest też z opadami dużego gradu (Knight i Knight 2001). Z superkomórkami burzowymi związana jest także sygnatura *V-notch*. To wcięcie w kształcie litery V związane jest z rozbieżnością wiatru w obrębie prądu wstępującego, często zapowiada możliwość wystąpienia gwałtownego prądu zstępującego (Popławska 2014b).

Superkomórka burzowa, która przeszła nad województwem świętokrzyskim nocą z 13 na 14 lipca 2024 r. była świetnym przykładem wystąpienia ekstremalnych zjawisk związanych z tego typu burzami.

2. Cel, dane i metody pracy

Celem pracy było rozpoznanie genezy, trasy oraz skutków burzy superkomórkowej, która przeszła nad województwem świętokrzyskim nocą 13/14 lipca 2024 r. Burza ta została wybrana do badań ze względu na jej destruktywny charakter, było to jedno z najsilniejszych tego typu zjawisk w ostatnich latach w województwie świętokrzyskim. Niewiele jest również szerszych opracowań dotyczących tego typu burz na prezentowanym obszarze.

Analizie poddano dostępną dokumentację fotograficzną (w tym zdjęcia wykonane za pomocą drona), zobra-

zowania radarowe oraz mapy synoptyczne. Wykorzystane zostały także informacje uzyskane podczas bezpośredniej obserwacji. Źródłem fotografii była przede wszystkim strona Storm Chasers Świętokrzyskie (<https://www.facebook.com/stormchaserssw>), na którą mieszkańcy województwa świętokrzyskiego nadsyłali zdjęcia. W artykule wykorzystano dane synoptyczne oraz mapy udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz stowarzyszenie Polscy Łowcy Burz (<https://lowcyburz.pl/>). W tekście ujęto także raporty z European Severe Weather Database (<https://eswd.eu/>), gdzie znajduje się bogata baza danych o niebezpiecznych zdarzeniach pogodowych. Analizie poddano również dane ze stacji pogodowych należących do IMGW (<https://danepubliczne.imgw.pl/>) oraz stacji amatorskich (<https://www.wunderground.com/>), które znalazły się na trasie burzy. Wykorzystano także dane z wcześniejszych analiz groźnych zjawisk pogodowych na wschodzie województwa świętokrzyskiego (Nadziałek 2024).

Do analizy superkomórki burzowej wykorzystano dane radarowe udostępniane przez IMGW dotyczące odbiciowości. Pochodziły one ze strony internetowej Radar Opadów (<https://old.radar-opadow.pl/>), na której dostępne są także dane archiwalne. Odbiciowość oznacza ilość echa, jakie powraca po odbiciu od hydrometeorów. Im więcej jest ich w atmosferze, tym więcej odbija się od nich promieniowania elektromagnetycznego i silniejsza jest odbiciowość (Pilorz i Laskowski 2017). W niniejszej pracy wykorzystano produkt CAPPI, czyli zobrazowanie echa radarowego w trakcie pomiaru na wybranej wysokości (Dziewit 2010). W tym przypadku była to wysokość 1 km. Jest to bardzo przydatne narzędzie, dzięki któremu można łatwo ocenić natężenie opadu w danej burzy. Prędkość porywów wiatru w burzy podano w km/h, natomiast sumę opadu w mm. Do opisu sytuacji synoptycznej wykorzystano standardowe parametry używane przy prognozowaniu burz. Chwiejność termodynamiczną wskazuje CAPE (ang. *convective available potential energy*), czyli energia potencjalna dostępna konwekcyjnie. Jej wartość jest tym wyższa, im większy jest pionowy gradient temperatury w troposferze. Warunki kinematyczne opisano za pomocą wybranych parametrów: DLS (ang. *deep layer shear* – uskoki pionowe wiatru w warstwie 0–6 km), LLS (ang. *low layer shear* – uskoki pionowe w warstwie 0–1 km), SRH (ang. *storm relative helicity* – względna skrętność burzowa w profilu 0–3 km). Określają one potencjał do zmiany siły i kierunku wiatru w różnych częściach troposfery (Ostrowski i in. 2010). Dane te pochodziły z numerycznych modeli pogodowych European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) oraz amerykańskiego Global Forecast System (GFS).

Analiza polegała na pozyskaniu materiałów: fotografii, skanów radarowych, map synoptycznych, prognoz pogody, danych ze stacji pogodowych. Następnie wszelkie dane badawcze były sprawdzane pod względem daty ich wykonania i lokalizacji. Dzięki temu istniała możliwość dokładnego prześledzenia trasy superkomórki burzowej i porównania fotografii zniszczeń z odpowiednimi ska-

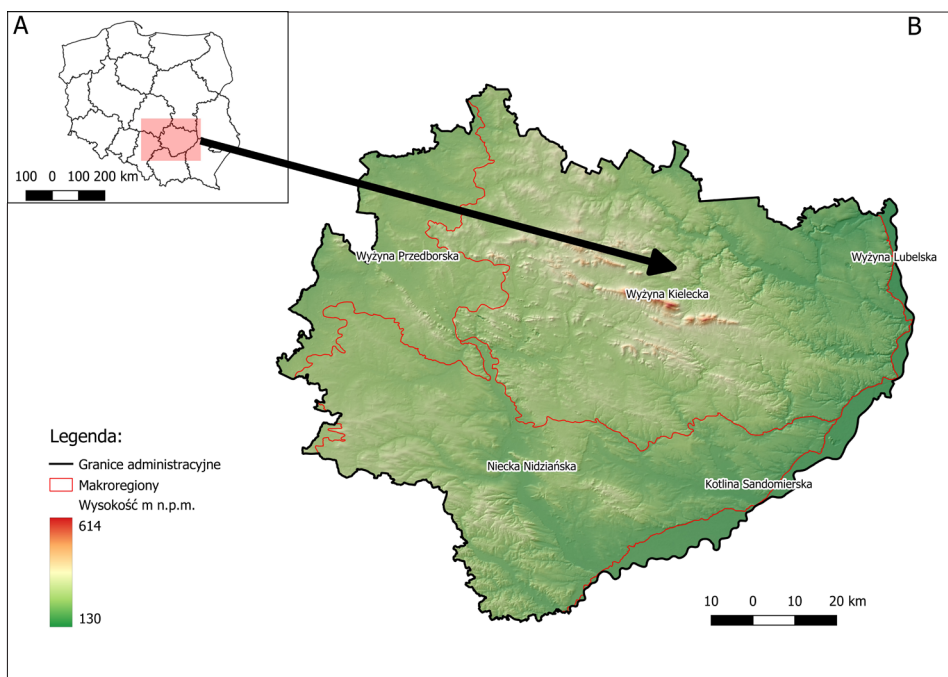
nami radarowymi i relacjami świadków zjawiska. Analiza prowadzona była chronologicznie – od najstarszych zdarzeń związanych z burzą do momentu jej osłabnięcia oraz opuszczenia granic województwa świętokrzyskiego. Wykorzystano również informacje z bezpośrednich obserwacji terenowych burzy przez autora. W pracy uwzględniono głównie skutki burzy związane z intensywnymi opadami deszczu, silnymi porywami wiatru oraz dużym gradem z powodu tego, że te zjawiska wyrządziły największe szkody podczas przechodzenia superkomórki. Finalnie dokonano porównania analizowanej burzy z innymi podobnymi zjawiskami w Europie oraz Polsce.

3. Obszar badań

Województwo świętokrzyskie położone jest w środkowej Polsce (rys. 3). Zajmuje ono powierzchnię około 11 710 km². Pod względem fizycznogeograficznym leży w obrębie podprovincji Wyżyny Małopolskiej, prowincji Wyżyny Polskie, makroregionów: Wyżyna Przedborska, Wyżyna Kielecka, Niecka Nidziańska oraz w niewielkim stopniu Wyżyna Lubelska i Kotlina Sandomierska (Richling i in. 2021).

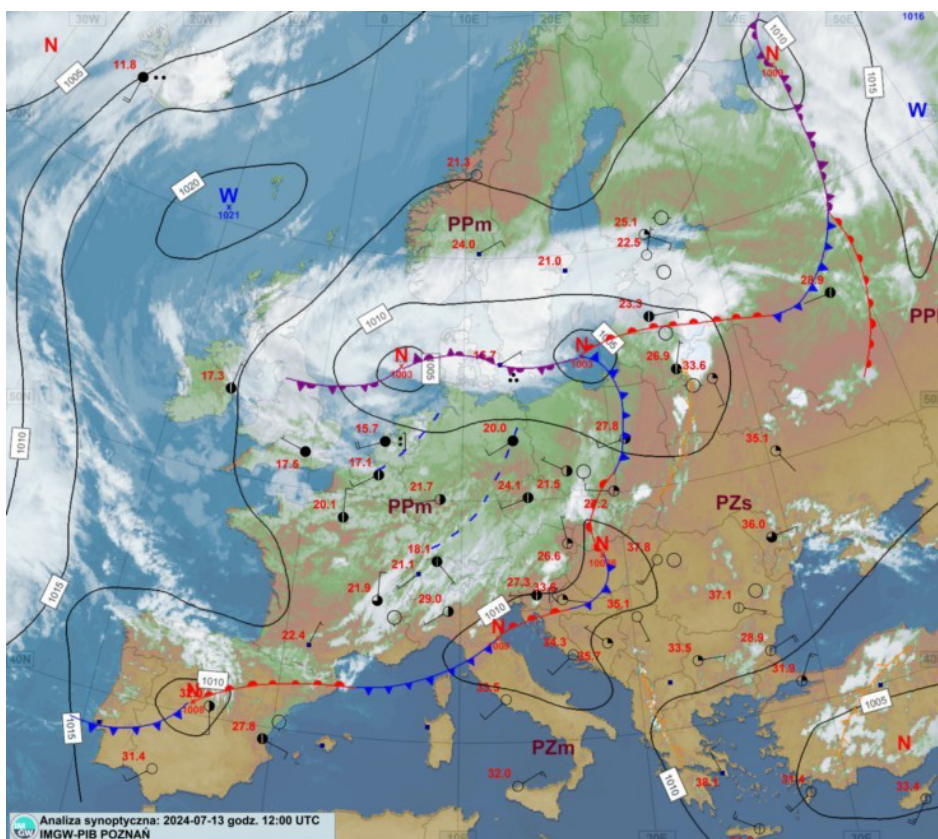
4. Sytuacja synoptyczna w dniu 13 lipca oraz w nocy 13/14 lipca 2024 r.

Polska w dniu 13 lipca 2024 r. znajdowała się pod wpływem układu niskiego ciśnienia z centrum nad Morzem Północnym, dodatkowo nad krajem rozwinął się również płytki niż wtórny (rys. 4). Z niżami barycznymi związany był układ frontów atmosferycznych, na wschód kraju przemieszczał się chłodny front atmosferyczny. Wypierał on zalegające nad krajem masy powietrza pochodzenia zwrotnikowo-starego. Przed frontem rozwinęła się również strefa konwergencji. Polska była podzielona na dwie strefy – wschodnią, cieplejszą oraz znacznie chłodniejszą zachodnią część kraju. Zalegające powietrze cechowało się dużą niestabilnością. Modele numeryczne ECMWF oraz GFS prognozowały wysokie wartości energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie do 1500–2000 J/kg. Bardzo sprzyjające dla rozwoju superkomórek były również parametry kinematyczne: uskoki pionowe wiatru w warstwie 0–6 km miały wartość do 20 m/s, z kolei w warstwie 0–1 km do 10 m/s. Wysoka była także względna skrętność burzowa, wartość SRH wyniosła do 200–250 m²/s². Takie warunki sprzyjały tworzeniu się mezocyklonu w burzach, a co za tym idzie także superkomórek burzowych (Popławska 2014). Modele numeryczne ECMWF oraz GFS jednoznacznie wskazywały, że burze będą mieć w analizowanym dniu potencjał do generowania nawalnych opadów deszczu w krótkim czasie, jak również silnych porywów wiatru oraz opadów dużego gradu, w mniejszym stopniu ryzyka trąby powietrznej ze względu na podwyższony poziom kondensacji. W ciągu dnia najlepsze warunki do rozwoju burz miały utrzymywać się na wschodzie województwa świętokrzyskiego, nocą z kolei istniało ryzyko wkroczenia do regionu silnego układu burzowego.



Rys. 3. Położenie województwa świętokrzyskiego na tle Polski (A) oraz na tle makroregionów (B) (oprac. na podstawie: Richling i in. 2021 oraz Główny Urząd Geodezji i Kartografii)

Fig. 3. The location of the Świętokrzyskie voivodeship in Poland (A) and in macroregions (B) (prepared on the basis of Richling *et. al.* 2021 and Central Office of Geodesy and Cartography)

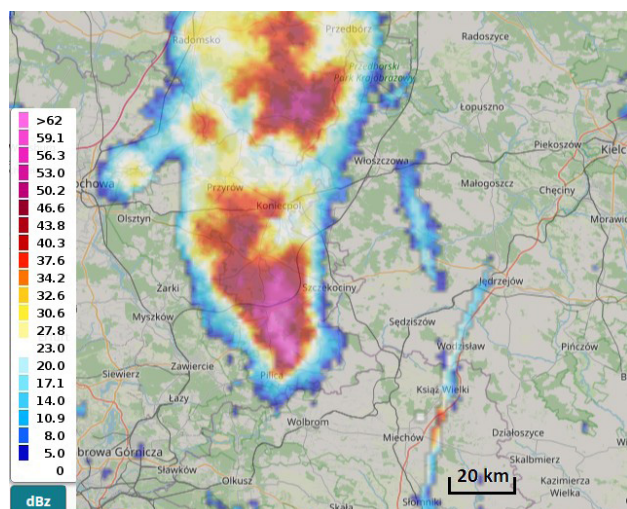


Rys. 4. Mapa synoptyczna obszaru Europy z dnia 13 lipca 2024 12:00 UTC
Źródło: <https://meteo.imgw.pl>

Fig. 4. Synoptic map of the European area on July 13, 2024 12:00 UTC
Source: <https://meteo.imgw.pl>

5. Analiza trasy superkomórki burzowej w nocy 13/14 lipca 2024 r.

Około godziny 21:00 UTC na granicy polsko-czeskiej, w rejonie Jastrzębia-Zdroju doszło do rozwoju komórek konwekcyjnych. Początkowo przybierały one formę izolowanych i dość niewielkich burz, przemieszczały się na północny-wschód (rys. 5). Przed północą jedna z burz znajdująca się w pobliżu Gliwic zaczęła wykazywać cechy superkomórki burzowej prawoskrętnej. Komórka ta zaczęła kierować się w odchyleniu na wschód względem tras innych burz. Około godziny 23:20 UTC burza uległa znacznej intensyfikacji. Z raportów Europejskiej Bazy Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych (ESWD) wynika, że w pobliżu Zawiercia już wtedy odnotowano szkody po silnych porywach wiatru w postaci uszkodzonego drzewostanu. Superkomórka przemieściła się dalej w rejon Szczekocin, jej sygnatura radarowa cechowała się silną odbiciowością. Burza wkroczyła do województwa świętokrzyskiego około 23:40 UTC. Wyróżniała się już wtedy bardzo dużą aktywnością elektryczną oraz wysoko wypiętrzoną kowadłem burzowym, dodatkowo superkomórka była zdolna do generowania opadów dużego gradu. W ESWD widnieją raporty, że w tym czasie w burzy występował intensywny opad gradu o średnicy około 3 cm, np. w okolicy Szczekocin (rys. 6). Pobliska stacja opadowa w Bonowicach zanotowała opad dobowy o wartości 38,3 mm.



Rys. 5. Obraz radarowy z dnia 14 lipca 2024 23:20 UTC
Źródło: <https://old.radar-opadow.pl>

Fig. 5. Radar image from July 14, 2024 23:20 UTC
Source: <https://old.radar-opadow.pl>

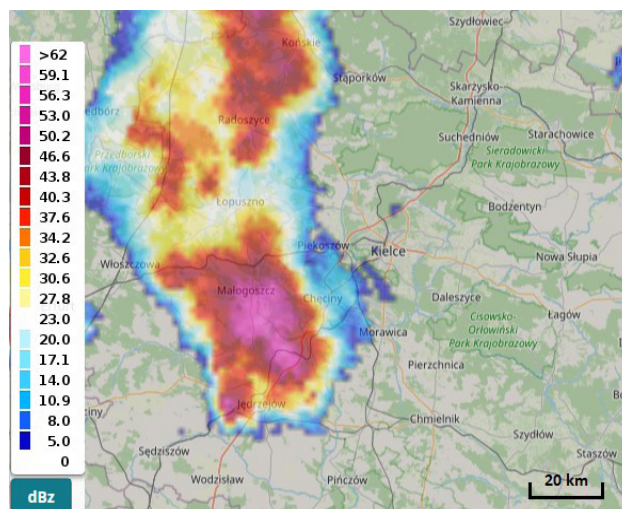
Superkomórka burzowa z dużą gwałtownością przemieszczała się przez powiat włoszczowski oraz jędrzejowski pomiędzy godziną 23:40 a 00:20 UTC. Na obrazie radarowym z godziny 00:10 UTC w okolicy Jędrzejowa wyraźnie widoczna była zbita struktura rdzenia burzy, odbiciowość przekraczała w wielu miejscach 60 dBz (rys. 7), co oznaczało występowanie nawalnego opadu deszczu oraz wysokie prawdopodobieństwo gradu. Przy odbiciowości 55 dBz przyjmuje się, że suma opadu może wynosić

100 mm/godz. (Pilorz i Laskowski 2017). Niestety, w powiecie jędrzejowskim na trasie burzy nie znajdowała się żadna stacja opadowa IMGW, pobliska stacja w Kliszowie (powiat pińczowski) została w większości ominięta przez burzę i zanotowała jedynie opad wielkości 9 mm, podobnie jak amatorskie stacje meteorologiczne znajdujące się w Jędrzejowie oraz Sędziszowie, odpowiednio o wartości 8,13 mm oraz 12,4 mm. Zabrakło dostępnych danych również ze stacji opadowej Konieczno (powiat włoszczowski).



Rys. 6. Gradziny po burzy z 13/14.07.2024 r., Szczekocin
Źródło: Tomasz Billu/Myszkowsky Łowcy Burz

Fig. 6. Hailstones after the storm of July 13/14, 2024, Szczekocin
Source: Tomasz Billu/Myszkowsky Hunters Storms



Ryc. 7. Obraz radarowy z dnia 14 lipca 2024 00:10 UTC
Źródło: <https://old.radar-opadow.pl>

Fig. 7. Radar image from July 14, 2024 00:10 UTC
Source: <https://old.radar-opadow.pl>

W ESWD można odnaleźć informacje o 7 zdarzeniach związanych z opadem dużego i intensywnego gradu. Wielkość gradzin spadających w powiecie jędrzejowskim oraz włoszczowskim wynosiła od 2,5 cm do nawet 4 cm (rys. 8A). Opady gradu połączone były także z nawalnym deszczem, na obrazach radarowych widoczna była silna odbiciowość (rys. 7). Znaczna wielkość gradzin i ich duża ilość była przyczyną szkód w uprawach (rys. 8B). Rolnicy szacowali, że w niektórych miejscach w powiecie jędrze-

jowskim ich straty sięgały nawet 100%. Superkomórka burzowa generowała także na tym obszarze bardzo silne porywy wiatru związane z prądem zstępującym burzy. W połączeniu z gradem potęgowało to występowanie szkód w uprawach rolnych. Sam wiatr czynił także ogromne zniszczenia w drzewostanie oraz uszkadzał budynki (głównie zrywał dachy). W powiecie włoszczowskim oraz jędrzejowskim odnotowano łącznie 33 zdarzenia związane z gwałtownym wiatrem w ESWD. Jak podawał serwis Echo Dnia, straż pożarna interweniowała w powiecie jędrzejowskim 270 razy, odnotowano łącznie 51 uszkodzonych budynków mieszkalnych i 52 budynków gospodarczych. W powiecie włoszczowskim było 60 interwencji, uszkodzonych zostało 9 budynków mieszkalnych i 5 budynków gospodarczych, w tym silosy (rys. 9B). Zniszczenia w drzewostanie (rys. 9A) na tym obszarze były na tyle poważne, że w części lasów znajdujących się w obrębie Nadleśnictwa Jędrzejów, w okolicy takich miejscowości, jak Caców, Oksa, Cierno, Kanice i Czarny Las został wprowadzony zakaz wstępu do lasów. Warto jednak zauważyć, że wszelkie szkody w tutejszych lasach nie były skutkiem trąby powietrznej. Na dostępnych zdjęciach z drona (rys. 9C) widać, że drzewa powalone są w jednym kierunku, nie są powykręcane. Wiatr więc wiał z jednego konkretnego kierunku, co nie miałyby miejsca w przypadku trąby powietrznej. Badacze z ESWD oszacowali na podstawie zniszczeń, że maksymalna prędkość porywów wiatru na tym obszarze mogła dochodzić do 180 km/h, co odpowiada stopniowi 1,5 w Międzynarodowej Skali Fujity (International Fujita – IF). Warto dodać, że amatorskie stacje meteorologiczne znajdujące się na tym obszarze, nie odnotowały silnych porywów wiatru.



Rys. 8. A – gradziny po burzy z 13/14.07.2024, Nagłowice (fot. M. Wąwoźniak); B – szkody w uprawach kukurydzy po burzy z 13/14.07.2024, Potok Wielki (źródło: OSP Potok Wielki)

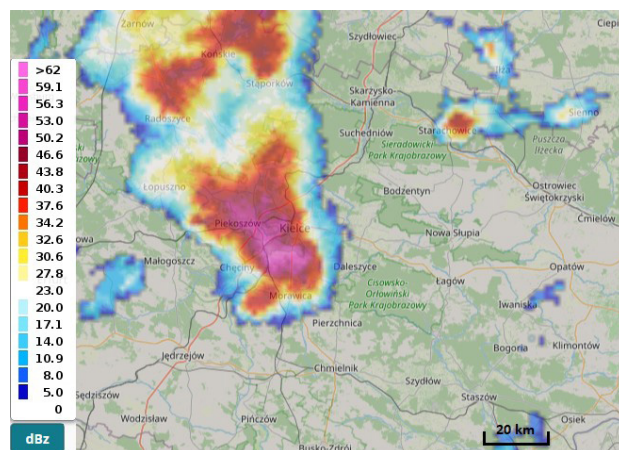
Fig. 8. A – hail after storm of 13/14.07.2024, Nagłowice (photo by M. Wąwoźniak); B – damage to corn crops after storm of 13/14.07.2024, Potok Wielki (source: Volunteer Fire Department in Potok Wielki)

Około godziny 00:20–00:50 UTC superkomórka burzowa przemieszczała się nad powiatem kieleckim oraz Kielcami. Burza nadal była bardzo silna, generowała nawalne opady deszczu, duży grad oraz silne porywy wiatru. Na obrazach radarowych utrzymywała się bardzo wysoka odbiciowość przekraczająca 60 dBz (rys. 10). Wysoka była także aktywność elektryczna burzy, podczas jej przecho-



Rys. 9. A – powalone drzewo po burzy z 13/14.07.2024, okolice Sędziszowa (źródło: Echo Dnia Świętokrzyskie); B – uszkodzony silos na skutek silnego wiatru po burzy z 13/14.07.2024, Moskorzew (źródło: KP PSP Włoszczowa); C – zniszczony las po burzy z 13/14.07.2024, okolice Popowic (fot. M. Nowakowski)

Fig. 9. A – fallen trees after the storm of 13/14.07.2024, near Sędziszów (source: Echo Dnia Świętokrzyskie); B – damaged silo due to strong winds after the storm of 13/14.07.2024, Moskorzew (source: District Headquarters of the State Fire Service Włoszczowa); C – destroyed forest after the storm of 13/14.07.2024 near Popowice (photo by M. Nowakowski)



Rys. 10. Obraz radarowy z dnia 14 lipca 2024 00:20 UTC

Źródło: <https://old.radar-opadow.pl>

Fig. 10. Radar image from July 14, 2024 00:20 UTC

Source: <https://old.radar-opadow.pl>

Stacja synoptyczna IMGW Kielce-Suków zanotowała opad o wartości 28,7 mm, główna część burzy ominęła jednak ten obszar. Stacje amatorskie zlokalizowane w Kielcach notowały jednak podobne wartości opadu o wartości 22 mm, jednakże chwilowe natężenie sięgało 80–100 mm. Przyczyniło się to do wystąpienia zjawiska powodzi błyskawicznej (ang. *flash flood*) w Kielcach (rys. 11). Zalania wystąpiły na ulicach Sienkiewicza, Warszawskiej, Staszica, Małej, Bodzentyńskiej, Piotrkowskiej, Żytniej, Grunwaldzkiej, jak również na Rynku. Odnotowano je także w pobliskich Chęcinach i Nowinach. Nawalnym opadom towarzyszył intensywny opad gradu, gradziny miejscami utrzymywały się aż do godzin porannych przy-

pominając pokrywą śnieżną (rys. 11A–B). Według ESWD wielkość gradu wynosiła od 2 do 3,5 cm średnicy, zgłoszono tam 14 raportów, najwięcej w Kielcach. W połączeniu z silnym wiatrem grad ten czynił szkody, głównie w postaci odbitek na blachach samochodów czy uszkodzeń dachów i balkonów.

Największe szkody w powiecie kieleckim i w Kielcach wystąpiły jednak na skutek niszczycielskich porywów wiatru związanych z prądem zstępującym burzy. Znacznie ucierpiał okoliczny drzewostan, drzewa były obalane na samochody i uszkodziły nagrobki na Cmentarzu Starym w Kielcach (rys. 11C). Na rynku w Kielcach silny wiatr zdestawował ogródki gastronomiczne. Poważnie uszkodzone zostały domy na kieleckim Białogonie, w niektórych budynkach zerwany został cały dach (rys. 11D). Łamane były także znaki drogowe. Meteorolodzy z ESWD ocenili występujące tu porywy po zaistniałych szkodach na około 120 km/h. Łącznie zgłoszono 22 raporty dotyczące niszczycielskiego wiatru. Okoliczne stacje amatorskie nie odnotowały jednak większych porywów wiatru. Według Komendy Państwowej Straży Pożarnej w Kielcach odnotowano tam niemal 300 zgłoszeń związanych z burzami. Skutki burz usuwało niemal 40 zastępów straży pożarnej.

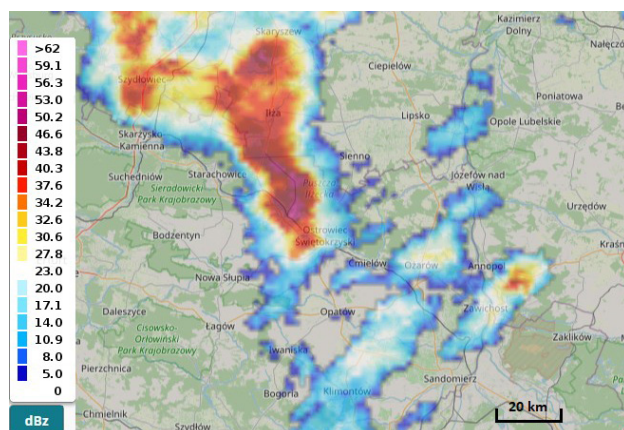


Rys. 11. A–B – zalane ulice wraz z gradzinami w Kielcach po burzy z 13/14.07.2024 (źródło: WKielcach.info); C – powalone drzewa na Cmentarzu Starym w Kielcach (źródło: kielce.naszemiasto.pl); D – zniszczony dach w jednym z budynków w Białogonie (źródło: kielce.naszemiasto.pl)

Fig. 11. A–B – flooded streets with hailstones in Kielce after the storm of 13/14.07.2024 (source: WKielcach.info); C – fallen trees at the Old Cemetery in Kielce (source: kielce.naszemiasto.pl); D – destroyed roof of a building in Białogon (source: kielce.naszemiasto.pl)

Między godziną 01:00 UTC a 01:40 UTC superkomórka burzowa przemieszczała się przez północno-wschodnią część województwa świętokrzyskiego i dopiero po przejściu głównego pasma Gór Świętokrzyskich stopniowo zaczęła tracić na sile. Odbiciowość burzy wyraźnie się zmniejszyła (rys. 12), co oznaczało spadek natężenia opadu deszczu i mniejsze prawdopodobieństwo gradu. Posterunek opadowy IMGW w Nosowie odnotował sumę opadu wynoszącą 9 mm, taką samą wartość odnotowała stacja w Brodach Łżeckich. Tymczasem prywatna stacja meteorologiczna, znajdująca się w okolicy Starachowic, w momencie przechodzenia burzy zanotowała sumę opa-

du o wartości 16,8 mm, kolejna stacja amatorska znajdująca się w Kunowie odnotowała już jedynie 5 mm opadu deszczu. Żadne z urzędów nie rejestrowało jednak silnych porywów wiatru. Te jednak występowały, choć już nie tak silne jak miało to miejsce w południowej i centralnej części województwa świętokrzyskiego. W ESWD zawarte są jeszcze 3 raporty dotyczące silnych porywów wiatru, były one związane głównie z powalonymi drzewami (rys. 13A) i uszkodzeniami dachów. Straż pożarna interweniowała na terenie powiatu starachowickiego 28 razy. Mimo że burza znacznie osłabła, na jej czele ciągle znajdował się bardzo efektowny wał szkwałowy (rys. 13B). Chmura ta tworzy się zwykle na czele silnych burz, była zapowiedzią możliwości wystąpienia silnych porywów wiatru (Wołoszyn 2009). Co ciekawe, podobna superkomórka burzowa przeszła nad tą częścią województwa świętokrzyskiego w sierpniu 2019 r., wtedy jednak zjawisko generowało na tym obszarze znacznie silniejsze porywy wiatru, które przyczyniły się do szkód głównie w okolicy Ostrowca Świętokrzyskiego (Nadzielek 2024). Także i wtedy na czele burzy znajdował się rozbudowany wał szkwałowy. Silna superkomórka burzowa przeszła nad tym rejonem także w maju 2019 r., choć wtedy głównym zagrożeniem były opady gradu.



Rys. 12. Obraz radarowy z dnia 14 lipca 2024 01:20 UTC
Źródło: <https://old.radar-opadow.pl>

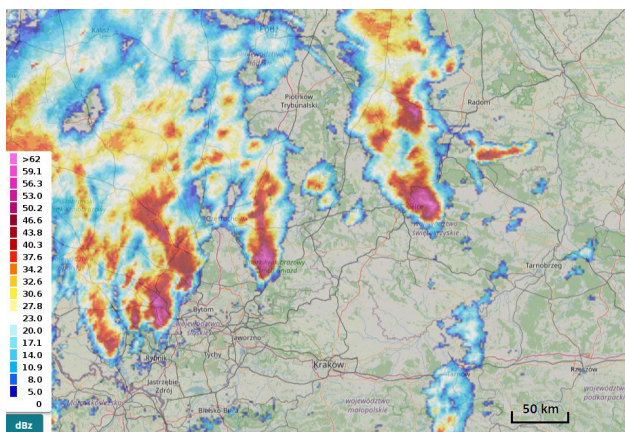
Fig. 12. Radar image from July 14, 2024 01:20 UTC
Source: <https://old.radar-opadow.pl>



Rys. 13. A – powalone drzewo w okolicy Starachowic (źródło: OSP Krynki); B – wał szkwałowy na czele superkomórki burzowej w okolicy Ostrowca Świętokrzyskiego (fot. W. Nadzielek)

Fig. 13. A – fallen tree near Starachowice (source: Krynki Volunteer Fire Department); B – shelf cloud on the leading edge of a supercell storm near Ostrowiec Świętokrzyski (photo by W. Nadzielek)

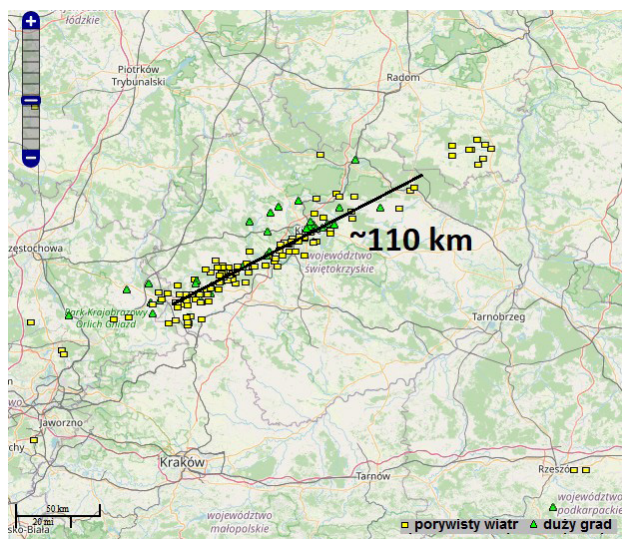
Omawiana superkomórka burzowa opuściła województwo świętokrzyskie około godziny 02:00 UTC. Burza przemieszczała się następnie przez województwo lubelskie i mazowieckie, po czym przystoczyła się w rozległy klastery opadowy. Znik burzy nie oznaczał jednak uspokojenia sytuacji pogodowej w województwie świętokrzyskim. Za omawianą superkomórką burzową przemieszczała się jednak kolejna seria burz (rys. 14), jednakże nie generowały one na swojej trasie już tak groźnych zjawisk. Ostatecznie burze znikły o poranku 14 lipca. W dzień nie rozwinęły się już zjawiska burzowe.



Rys. 14. Obraz radarowy z dnia 14 lipca 2024 00:30 UTC, widoczna seria burz przemieszczających się za omawianą superkomórką
Źródło: <https://old.radar-opadow.pl>

Fig. 14. Radar image from July 14, 2024 00:30 UTC, showing a series of thunderstorms moving behind the supercell
Source: <https://old.radar-opadow.pl>

Analizowana superkomórka burzowa przyczyniła się do powstania znacznych szkód na obszarze województwa świętokrzyskiego. Zniszczenia po silnym wietrze, dużym gradzie i nawalnych opadach odnotowano już na granicy z województwem śląskim (rys. 15), występując następnie w centrum regionu (w tym w Kielcach), szkody miały miejsce również w powiecie starachowickim. Silne porywy wiatru odnotowano także w województwie mazowieckim. Szlak zniszczeń w województwie świętokrzyskim wyniósł około 110 km, natomiast wraz z innymi województwami długość ta wzrasta do około 190 km. Mocno ucierpiały uprawy rolne. Zarząd Świętokrzyskiej Izby Rolniczej wskazał, że zniszczonych zostało miejscami nawet 95% upraw kukurydzy, rzepaku, grochu i pszenicy. Władze gminy Słupia w powiecie jędrzejowskim wskazały, że w wyniku burzy uszkodzonych zostało nawet 5 tys. ha powierzchni rolnych. Poważnie dotknięte zostały również lasy. Według Lasów Państwowych najbardziej dotkniętymi leśnictwami były Czarny Las, Oksa, Cierno, Caców, Kanice, Bizorenda, a w mniejszym stopniu leśnictwa Lasków i Mnichów. I choć zniszczenia dotyczyły tu głównie wiatrołomów, to na skutek gradobicia obserwuje się obecnie zamieranie lasów na skutek utraty igliwia (rys. 16).



Rys. 15. Raporty w Europejskiej Bazie Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych dotyczące burzy z 13/14.07.2024 w województwie świętokrzyskim (źródło: <https://eswd.eu/>)

Fig. 15. Reports in the European Severe Weather Database regarding the storm of 13/14.07.2024 in the Świętokrzyskie voivodeship (source: <https://eswd.eu/>)



Rys. 16. Zamierający las w Nadleśnictwie Jędrzejów
Źródło: <https://www.lasy.gov.pl>

Fig. 16. Dying forest in the Jędrzejów Forest District
Source: <https://www.lasy.gov.pl>

6. Dyskusja

Analizowana superkomórka burzowa jest dobrym przykładem, jak bardzo destruktywne są tego typu zjawiska konwekcyjne w strefie umiarkowanej. Choć superkomórki są stosunkowo rzadkim zjawiskiem, to każdego roku dochodzi do wystąpienia kilku takich burz, które powodują szkody. Szczegółowa analiza takich zjawisk pozwala na ustalenie najbardziej sprzyjających warunków do ich rozwoju, co może być podstawą ich prognozowania.

Badania nad burzami superkomórkowymi są od lat prowadzone, głównie w Stanach Zjednoczonych, a także w Eurazji. Dahl (2006) stwierdził, że większość tego typu burz w Europie powstaje w środowisku wysokiej niestabilności (duże wartości CAPE) oraz silnych uskoków prędkości wiatru. Przedstawił przykłady superkomórek burzowych formujących się w korzystnych warunkach pogodowych, np. silna burza gradowa nad Monachium 12 lipca 1984 r.

Powstała ona, podobnie jak omawiana w tym artykule superkomórka, w środowisku znacznej chwiejności (CAPE do 1000–1500 J/kg) oraz silnych uskoków prędkości wiatru (do 25 m/s) w warstwie 0–6 km. Przez większość dnia inwersja w troposferze blokowała rozwój konwekcji. Jednakże późnym popołudniem konwekcja przebiła warstwę hamującą (poziom inwersji) i doszło do rozwoju gwałtownej burzy. Takie warunki spowodowały opad gradu do 14 cm średnicy, które raniły około 400 osób. Niebezpieczne komórki konwekcyjne nie zawsze tworzą się podczas występowania dużych wartości parametru CAPE czy silnych pionowych uskoków prędkości wiatru, np. superkomórka z 31 maja 2003 r. nad południowym Monachium, z opadem gradu do 5 cm średnicy. Powstała ona w warunkach niewielkiej/umiarkowanej chwiejności (CAPE do 500–1000 J/kg), a pionowe ścinanie wiatru w troposferze było minimalne (DLS do 8 m/s).

Schmid i in. (1997) przeanalizował superkomórki z dużym gradem w Szwajcarii od czerwca do sierpnia 1992 r. Każda z tych komórek konwekcyjnych pozostawiła po sobie szlaki gradowe o długości około 70–100 km. Burze te przeszły w ciągu dnia, tworząc się nad Alpami i Jurą, a następnie przemieszczając nad pogórze w środkowej części kraju.

W przeciwieństwie do burz w Szwajcarii, analizowana nawałnica powstała w Bramie Morawskiej i przemieszczała się nad obszarem Kotliny Oświęcimskiej o mało zróżnicowanej rzeźbie. W superkomórkę przeobraziła się dopiero na Wyżynie Śląskiej, która ma bardziej zróżnicowaną, często kuestową morfologię. Superkomórka była najsilniej rozwinięta na Płaskowyżu Jędrzejowskim, a osłabła nad Górami Świętokrzyskimi.

Obszar obejmujący Wyżynę Krakowsko-Częstochowską po Nizinę Mazowiecką sprzyja powstawaniu superkomórek burzowych powodujących duże szkody. Na tym terenie rozwinęła się superkomórka 15 sierpnia 2008 r. z silnymi trąbami powietrznymi i prądami zstępującymi, które generowały duże szkody (Taszarek 2016). Superkomórka ta powstała w środowisku silnych pionowych uskoków prędkości wiatru (do 25 m/s), względna skrętność burzowa w warstwie 0–3 km (parametr SRH) wynosiła do 260–340 m²/s² (Popławska 2014b). Z rozmieszczenia opadów bardzo dużego gradu (w tym z superkomórek burzowych) z lat 2007–2015 wynika, że województwo świętokrzyskie leży na obszarze szczególnie narażonym na tego typu zjawiska. Najczęściej pojawiają się one w lipcu, w godzinach popołudniowych (Pilorz 2015). W 2012 r. w Polsce wystąpiło kilka silnych superkomórek burzowych z dużym gradem. Większość z nich powstała podczas przechodzenia chłodnego frontu atmosferycznego oraz napływie ciepłych mas z południowo-zachodu (Taszarek i Suwała 2015). Silna superkomórka burzowa narodziła się 20 czerwca 2016 r. na Słowacji. Burza ta nie musiała „konkurować” o warunki z innymi komórkami konwekcyjnymi. Ta długotrwała i izolowana burza objęła południową i wschodnią część województwa świętokrzyskiego z opadami gradu do 4,5 cm, natomiast w województwie

lubelskim wystąpiła trąba powietrzna (Pilgaj i in. 2019). W przypadku omawianej burzy z nocy 12/13 lipca 2024 r. opady dość sporego gradu (do 4–4,5 cm średnicy) występowały nietypowo, również nocą. Nie utworzyła się trąba powietrzna.

Analogiczna do omawianej w tym artykule burzy była superkomórka z nocy 12/13 sierpnia 2019 r. Trasa komórki konwekcyjnej przez województwo świętokrzyskie przebiegała w bardzo podobny sposób jak w nawałnicy z 2024 r. Rozwinęła się w warunkach nieco mniejszej chwiejności (CAPE do 1300 J/kg), lecz silniejszych pionowych uskoków prędkości wiatru (DLS do 30 m/s). Głównym zagrożeniem w tej burzy były silne prądy zstępujące, które spowodowały szkody wiatrowe (Nadziałek 2024).

7. Podsumowanie i wnioski

Województwo świętokrzyskie jest obszarem, nad którym superkomórki burzowe występują niemal co roku. Nierzadko są to zjawiska generujące niebezpieczne porywy wiatru czy duże gradziny. Najwięcej tego typu burz ma tu miejsce, gdy chłodny front atmosferyczny wypiera ciepłe niestabilne masy pochodzenia zwrotnikowego. W połączeniu ze znaczną chwiejnością, głównie dobrymi warunkami kinematycznymi, sprzyja powstaniu superkomórki burzowej.

Omawiana burza z 12/13 lipca 2024 r. generowała na swojej trasie ekstremalne zjawiska, głównie w postaci bardzo silnych porywów wiatru, opadów dużego gradu do 4,5 cm średnicy oraz nawałnych opadów deszczu. Powstała w czasie przejścia chłodnego frontu atmosferycznego wypierającego niestabilne i ciepłe masy powietrza zwrotnikowego starego. Stworzyło to dobre warunki kinematyczne w postaci silnych pionowych uskoków prędkości wiatru, znacznej względnej skrętności burzowej w warstwie 0–3 km. Omawiana superkomórka burzowa była typową tego rodzaju burzą jakie występują także w innych częściach Europy. Burza ta przyczyniła się do sporych szkód w drzewostanie, zwłaszcza w południowo-zachodniej oraz centralnej części województwa świętokrzyskiego. Uszkodzone zostały także budynki mieszkalne, gospodarcze czy samochody. Część drzew, które nie zostały powalone przez wiatr, utraciło także igliwie w wyniku opadów dużego gradu, przez co zaczęły z czasem zamierać. Tak jest na przykład w Nadleśnictwie Jędrzejów. Największą siłę burza wygenerowała przechodząc przez Płaskowyż Jędrzejowski oraz przemieszczając się przez Kielce. Zbliżając się do Gór Świętokrzyskich burza znacznie osłabła. Być może tutejsza rzeźba terenu ma wpływ na przebieg zjawisk, choć wymaga to dalszych badań.

Nie był to pierwszy przypadek tak silnej superkomórki burzowej w województwie świętokrzyskim. Wcześniej groźne burze superkomórkowe przechodziły przez ten teren, m.in. w sierpniu 2019 r. czy czerwcu 2016 r. Omawianą burzę wyróżniło jednak to, że w jej przypadku dostępnych było o wiele więcej fotografii i relacji na temat szkód i zaistniałych zjawisk. Umożliwiło to dokładną ana-

lizej jej trasy wraz z omówieniem konkretnych zagrożeń jakie burza generowała na swojej trasie. Dane pozyskane ze stacji IMGW i prywatnych stacji meteorologicznych są niepełne i nie odzwierciedlają pełni siły zjawisk towarzyszących burzy (wiatr i opad). Burza w większości ominęła stacje meteorologiczne, przez co brak jest konkretnych informacji na temat siły porywów wiatru w rdzeniu burzy.

Podziękowania

Autor pragnie podziękować dr hab. prof. UJK Tomaszowi Kalickiemu oraz dr Pawłowi Przepiórze za wsparcie merytoryczne. Pragnę również wyrazić uznanie wszystkim osobom, które zgodziły się na publikację zdjęć.

8. Literatura

- Bielec-Bąkowska Z. 2002. Zróznicowanie przestrzenne i zmienność wieloletnia występowania burz w Polsce. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Bielec-Bąkowska Z. 2013. Burze i grady w Polsce. *Prace Geograficzne* 132: 99–132.
- Brooks H.E. 2013. Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research* 123: 129–138.
- Dahl J.M.L. 2006. Supercells – Their Dynamics and Prediction. Free University of Berlin, Berlin.
- Dane publiczne IMGW-PIB. [online]: <https://danepubliczne.imgw.pl/> [dostęp: 17.01.2025].
- Davies J.M., Johns R.H. 1993. Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1: Wind shear and helicity, [w:] Church C., Burgess D., Doswell C., Davies-Jones R. 1993. The tornado: Its structure, dynamics, prediction and hazards. *Geophysical Monograph Series American Geophysical Union* 79: 573–582.
- Diemientiew G. 2018. Ekstremalne zjawiska pogodowe w Polsce w dobie zmian klimatycznych na przykładzie powodzi i silnych wiatrów. *Kultura Bezpieczeństwa Nauka Praktyka Refleksje* 32: 79–100.
- Dziewit Z. 2010. Wykorzystanie radarów meteorologicznych w osłonie lotnictwa. IMGW.
- European Severe Weather Database. [online]: <https://eswd.eu/> [dostęp: 24.10.2024].
- Fujita T.T. 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD. *SMRP Research Paper* 156: 104.
- Fujita T.T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *Journal of the Atmospheric Sciences* 38: 1511–1534.
- Grabowska K. 2014. Ciągi dni burzowych w Polsce i ich zależność od typów cyrkulacji atmosferycznej i warunków synoptycznych. *Prace i Studia Geograficzne* 56: 7–118.
- Graczyk D. 2013. Warunki temperaturowe Polski w zmieniającym się klimacie Europy. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań.
- Hov Ø., Cubasch U., Fischer E.M., Höppe P., Iverson T., Kvamstø N.G., Kundzewicz Z.W., Rezacova D., Rios D., Santos F.D., Schädler B., Veisz O., Zerefos C., Benestad R.E., Norton M., Murlis J. 2013. Trends in extreme weather events in Europe: Implications for national and European Union adaptation strategies. *EASAC*.
- IPCC 2007. Zmiana klimatu 2007. Raport Syntetyczny 2009. Wkład Grup roboczych I, II, III do czwartego raportu oceniającego Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu. Główny zespół Autorski, Pachauri K., Reisinger A. (red.). Wydawnictwo Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa.
- IPCC 2018. Asia. [online]: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg2-chapter10-2.pdf> [dostęp: 16.01.2025].
- IPCC 2021. Podsumowanie dla decydentów. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Tignor M., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A. (red.), [w:] Zmiana klimatu 2022. Zagrożenia, adaptacja i wrażliwość. Podsumowanie dla decydentów. Wkład II Grupy Roboczej do 6. Raportu Podsumowującego Międzyrządowego Panelu ds. Zmiany Klimatu. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (red.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: 3–33.
- Jarzyna K. 2016. Ekstrema termiczne w Górach Świętokrzyskich na przełomie XX i XXI wieku. *Prace Geograficzne* 147: 99–118.
- Jarzyna K., Krupa J., Zieliński A. 2017. The use of archived precipitation data in the assessment of soil erosion risk in the Świętokrzyskie Province of central-southern Poland. *Geology, Geophysics and Environment* 43: 201–211.
- Knight C.A., Knight N.C. 2001. Hailstorms, [w:] Doswell C.A. (red.), Severe Convective Storms. American Meteorological Society, Boston: 223–254.
- Kożuchowski K. 2011. Klimat Polski. Nowe spojrzenie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Leziak K. 2015. Powstawanie trąb powietrznych. Meteorologiczne uwarunkowania tornadogenezy i charakterystyka układów konwekcyjnych. Uniwersytet Warszawski.
- Lorenc H., Cebulak E., Głowicki B., Kowalewski M. 2012. Struktura występowania intensywnych opadów deszczu powodujących zagrożenie dla społeczeństwa, środowiska i gospodarki Polski, [w:] Lorenc H. (red.), Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju. IMGW, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa: 7–32.
- Markowski P.M. 2002. Hook echoes and Rear-Flank Downdrafts: A Review. *Monthly Weather Review* 130: 852–876.
- Meteo IMGW. [online]: <https://meteo.imgw.pl/> [dostęp: 24.10.2024].
- Miętus M. 2014. Istota zjawisk ekstremalnych. Ich występowanie na świecie i w Polsce. Instytut Geografii UG, Gdańsk.
- Moller A.R., Doswell C.A., Foster M.P., Woodall G.R. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorms environments and storm structures. *Weather Forecasting* 9: 327–347.
- Nadziałek W. 2024. Meteorologiczne zdarzenia ekstremalne na Wyżynie Sandomierskiej w latach 2015–2022. Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach.
- Ostrowski K., Surowiecki A., Trębicki K. 2010. Przewodnik do prognozowania burz z użyciem map wskaźników konwekcyjnych. *Skywarn Polska*.
- Pilgus 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: 93–105.
- Pilorz W. 2015. Very large hail occurrence in Poland from 2007 to 2015. *Contemporary Trends in Geoscience* 4: 45–55.
- Pilorz W., Laskowski I. 2017. Obrazy radarowe źródłem informacji o zagrożeniach meteorologicznych. *Skywarn Polska*.
- Polscy Łowcy Burz – Skywarn Polska. [online]: <https://lowcyburz.pl/> [dostęp: 24.10.2024].
- Popławska J. 2014a. Tornada wywołane przez cyklony zwrotnikowe w Stanach Zjednoczonych (1950–2012). *Przegląd Geograficzny* 1–2: 57–72.
- Popławska J. 2014b. Tornada superkomórkowe w Polsce — studium przypadku z 15 sierpnia 2008. *Prace i Studia Geograficzne* 56: 205–229.
- Price C. 2009. Thunderstorms, Lightning and Climate Change, [w:] Betz H.D., Schumann U., Laroche P. (red.), *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer: 521–535.
- Radar Opadów Old. [online]: <https://old.radar-opadow.pl/> [dostęp: 24.10.2024].

- Rangwala I., Miller J.R., 2012. Climate change in mountains: A review of elevation-dependent warming and its possible cause. *Climatic Change* 114 (3–4): 527–547.
- Richling A., Solon J., Macias A., Balon J., Borzyszkowski J., Kistowski M., 2021. Regionalna geografia fizyczna Polski. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Schmid W., Schiesser H.-H., Bauer-Messmer B. 1997. Supercell storms in Switzerland: Case studies and implications for now casting severe winds with Doppler radar. *Meteorological Applications* 4: 49–67.
- Shenoy S., Gorinevsky D., Trenberth K.E., Chu S. 2022. Trends of extreme US weather events in the changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119: 1–10.
- Skywarn Polska. Cechy superkomórki burzowej. [online]: <https://lowcy-burz.pl/superkomorka/superkomorka-cechy/> [dostęp: 16.01.2025].
- Storm Chasers Świętokrzyskie. [online]: <https://www.facebook.com/stormchaserssw> [dostęp: 24.10.2024].
- Suwała K. 2014. Uwarunkowania synoptyczne występowania opadów gradu w środkowej Europie. Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych. Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Szuster P. 2013. O burzach i mechanizmie ich powstawania słów kilka. Gawęda o burzach. Skywarn Polska.
- Taszarek M. 2016. Climatology of thunderstorms and tornadoes in Poland. Uniwersytet Adama Mickiewicza, Poznań.
- Taszarek M., Suwała K. 2015. Large hail in Poland in 2012. *Quaestiones Geographicae* 34: 75–84.
- Taszarek M., Allen J.T., Marchio M., Brooks H.E. 2021a. Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data. *npj. Climate and Atmospheric Science* 4: 1–11.
- Taszarek M., Allen J.T., Brooks H.E., Pilgaj N., Czernecki B. 2021b. Differing Trends in United States and European Severe Thunderstorm Environments in a Warming Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102: 296–322.
- Tsarmagas I., Grabowska K. 2020. Skutki ekstremalnych zjawisk meteorologicznych w Polsce. Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego.
- Ustrnul Z., Wypych A., Henek E., Czekierda D., Walawender J., Kubacka D., Pyrc R., Czernecki B. 2014. Atlas zagrożeń meteorologicznych Polski. Wydawnictwo Attyka, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Kraków.
- Weisman M.L., Klemp J.B. 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms indirectionally-varying wind shears. *Monthly Weather Review* 112: 2479–2498.
- Wołoszyn E. 2009. Meteorologia i klimatologia w zarysie. Politechnika Gdańska, Gdańsk.