

Radarowa detekcja superkomórek burzowych w Polsce

Supercell storm radar detection in Poland

Wojciech PILORZ

Uniwersytet Śląski
Wydział Nauk o Ziemi
wojciech.pilorz@gmail.com

Abstract

“Supercell storms are capable of producing the most violent of hail, wind and tornado events (Moller et. al. 1994); thus they are the most important storm type to forecast and detect” (Moller 2001). Supercell storm is defined by “presence of a deep and persistent, rotating updraft called a mesocyclone” (Weisman and Klemp 1984). Mesocyclone presence leads to the specific vertical storm structure seen as a Bounded Weak Echo Region. Mesocyclone presence also leads to the changes in the horizontal shape of the storm, observed on the radar reflectivity in a low elevation as a hook echo. Large hail, associated with supercells, is a very important threat to detect. It can be easily recognized by the presence of the reflectivity more than 50 dBZ, above 8 km above ground level (Burgess and Lemon 1990). Nine cases of supercells in Poland between 2007 and 2013 were examined. Results show that all quoted features were present. Moreover, most of them appeared before the threat which they indicate. It means that threats associated with supercells can be predicted in a short time.

Key words: supercell storm, weather radar, radar signatures, nowcasting, meteorological threats

Słowa kluczowe: superkomórka burzowa, radar meteorologiczny, sygnatury radarowe, nowcasting, zagrożenia meteorologiczne

Wstęp

Superkomórka to szczególny rodzaj burzy, z którą związany jest cały szereg zagrożeń meteorologicznych. „Burze superkomórkowe są zdolne do formowania najbardziej niszczycielskiego gradu, dużych prędkości wiatru oraz tornad (Moller i in., 1994); tym samym są one najważniejszym rodzajem burzy przy detekcji i prognozowaniu” (Moller 2001). Rozpoznanie superkomórek umożliwiają radary meteorologiczne, dzięki detekcji charakterystycznych cech obrazów odbiciowości i prędkości radialnych. Niektóre z nich sygnalizują jedynie samą obecność superkomórki, inne – konkretne zagrożenie z nią związane, np. opady dużego gradu. Wyróżnikiem superkomórek jest „głęboki i stały, rotujący prąd wstępujący, zwany mezocyklonem” Weisman i Klemp (1984). Mezocyklon sprawia, że mają one zazwyczaj odchyłony tor ruchu dzięki czemu możliwe jest ich rozpoznanie nawet na ogólnodostępnych obrazowaniach radarowych. Cyrkulacja mezocyklonalna powoduje charakterystyczne, hakowate ułożenie strefy opadu, w postaci sygnatury „hook echo”, po raz pierwszy przedstawionej przez Fujitę

(1965) oraz charakterystyczną pionową strukturą burzy. Wyróżnia się w niej obszary o obniżonej odbiciowości (sygnatury Weak Echo Region i Bounded Weak Echo Region, nazywane dalej przy pomocy skrótu pierwszych liter odpowiednio: WER i BWER), będącymi miejscem występowania mezocyklonu, choć sygnatura ta może pojawiać się także w przypadku zwykłych prądów wstępujących o znacznej sile. Dzięki obecności rotującego prądu wstępującego, superkomórki posiadają także charakterystyczny wygląd na obrazach prędkości radialnych w postaci sąsiedztwa dwóch skrajnych kierunków wiatru o znacznej prędkości. Tego typu obrazy nie były jednak przedmiotem analizy w tej pracy. Maksimum odbiciowości oraz jego wysokość są także informacją o sile burzy, a zwłaszcza o potencjale gradowym danej komórki. Im wyższa wartość odbiciowości znajdzie się wyżej w atmosferze, tym większe zagrożenie niesie ze sobą dana burza. Rozpoznanie zagrożenia gradem może opierać się na technice Lemona (Burgess i Lemon 1990), polegającej na rozpoznaniu odbiciowości przekraczających 50 dBZ na wysokości większej niż 8 km. Odbiciowość na niskich poziomach daje także informację o prawdo-

podobieństwie wystąpienia gradu. Witt (1996), twierdzi, że burze niemal zawsze dają grad, gdy odbiciowość na niskiej elewacji przekracza 60 dBZ.

Celem pracy jest określenie, które z charakterystycznych cech obrazów radarowych (sygnatur radarowych), opisywanych w literaturze pojawiają się (i jak często) oraz w którym momencie trwania superkomórki ma to miejsce (przed czy po wystąpieniu groźnych zjawisk). Podjęto także próbę określenia czasu między pojawieniem się charakterystycznych sygnatur radarowych a momentem wystąpienia groźnego zjawiska towarzyszącego danej superkomórcie. Wszystkie analizy przeprowadzono w czasie UTC. Wytypowano i zbadano 9 przypadków superkomórek, które wystąpiły na terenie Polski w latach 2007 – 2013 i w zdecydowanej większości z nich stwierdzono opisywane sygnatury. Okazało się również, że w większości przypadków charakterystyczne sygnatury radarowe pojawiły się jeszcze przed wystąpieniem groźnych zjawisk. Największą przydatność wykazała odmienna trajektoria oraz rozpoznanie odbiciowości powyżej 50 dBZ na wysokości powyżej 8km techniką Lemona. Odmienną trajektorią wykazały się wszystkie spośród badanych superkomórek, zaś technika Lemona umożliwiła rozpoznanie wszystkich przypadków superkomórek, których głównym zagrożeniem był opad dużego gradu. Bardzo wysoką przydatnością wykazują się także obszary słabszego echa (8 wykrytych na 9 badanych przypadków). Przydatność pozostałych sygnatur lub cech była niższa, jednak wszystkie osiągnęły wynik powyżej 60%.

Źródło danych

Wszystkie dane radarowe z radarów: Ramza, Brzuchania, Gdańsk i Świdwin; obrazy: odbiciowości, zarówno płaskie, jak i przekroje pionowe; w skalach barw: RAINBOW (w której domyślnie przedstawiane są dane radarowe w polskim systemie), jak i NEXRAD (Next Generation Radar System – amerykański system radarowy) oraz zobrazowania powstałe na ich podstawie, a użyte do prezentacji polskich superkomórek w tej pracy, pochodzą z IMGW-PIB i zostały udostępnione do celów naukowych i dydaktycznych tejże pracy.

Detekcja superkomórek przy pomocy wybranych sygnatur radarowych

Obrazy radarowe (płaskie i trójwymiarowe) wybranych przypadków superkomórek, które wystąpiły na terenie Polski w latach 2007 – 2013 poddano analizie fotointerpretacyjnej by stwierdzić obecność opisanych wyżej sygnatur i cech, sygnalizujących obecność superkomórek i zagrożeń meteorologicznych z nimi związanych. Pokazano różne przypadki sygnatur radarowych, zarówno tych bardzo dobrze wykształconych, jak i tych słabo wykształconych, gdyż słaby stopień wykształcenia sygnatury nie oznacza mniejszego zagrożenia związa-

nego z daną superkomórką. Następnie określono czas między pojawieniem się sygnatury a pojawieniem się zagrożenia, określając tym samym przydatność danej sygnatury przy nowcastingu.

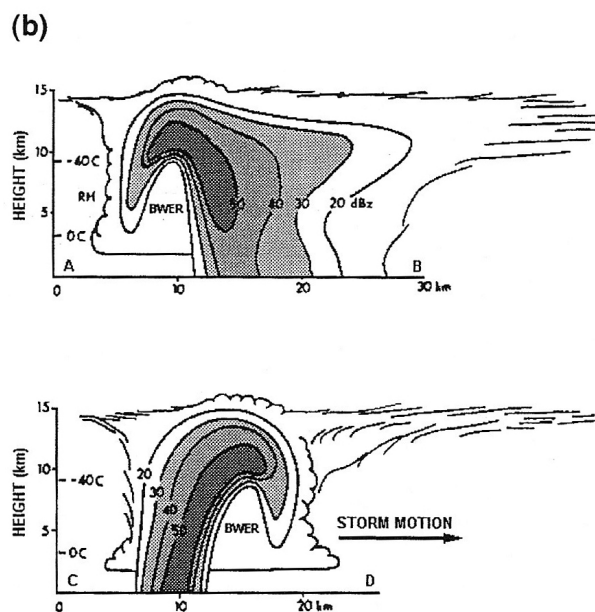
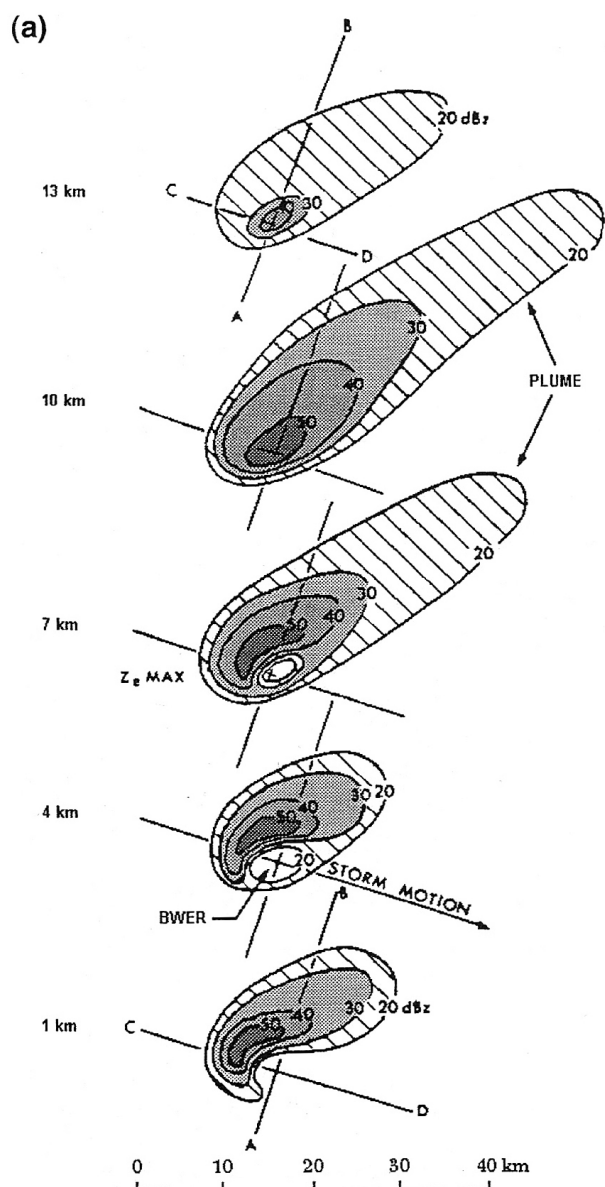
Obszar słabego echa i ograniczony obszar słabego echa (Weak Echo Region – WER i Bounded Weak Echo Region – BWER)

„Obszary te są interpretowane jako miejsca występowania silnych prądów wstępujących; echo jest w nich słabsze w stosunku do otoczenia, ponieważ prąd wstępujący jest tak silny, że duże gradziny nie są w stanie dostać się w jego centralne części, w których prędkość jest największa ani także rosnąć tam, z powodu zbyt krótkiego czasu przebywania w nim. Obecność BWER jest uważana za prognostyk szczególnie groźnej burzy. Wszystkie burze o wystarczającej wielkości i intensywności, które wygenerowały BWER, prawdopodobnie spowodują również wystąpienie zjawiska gradu” (Knight i Knight, 2001).

„Obszary słabej odbiciowości (WER), ograniczone obszary słabej odbiciowości (BWER) i nawisy odbiciowości radarowej są znacznie prostsze do zaobserwowania i często pojawiają się w opisach radarowych struktur w przypadku burz gradowych” (Knight i Knight, 2001). Sygnatury WER i BWER opisywane, jako cechy wskaźnikowe dla burz gradowych nie mówią jednoznacznie, że są cechami wskaźnikowymi superkomórek. Należy jednak podkreślić, że sygnatury te są bezpośrednim rezultatem występowania silnego prądu wstępującego, zaś szczególnym rodzajem silnego prądu wstępującego jest mezocyklon, będący zarazem wyróżnikiem superkomórek.

W wyniku przeprowadzonej analizy obrazów radarowych z wszystkich wybranych przypadków, stwierdzono obecność WER lub BWER w 8 przypadkach superkomórek na 9 analizowanych. Sygnaturom tym często towarzyszyły rozległe nawisy odbiciowości. Przeanalizowano także pionowe przekroje wzdłuż zadanego odcinka, które poprowadzono przez miejsca występowania mezocyklonu (analogicznie do ryc. 1), które sygnalizowane były opisywaną w dalszej części pracy sygnaturą „hook echo”.

W dalszej części pracy wybrano i przedstawiono najciekawsze przypadki występowania obszarów słabego echa. Superkomórka z dnia 10.06.2013r. utworzyła się nad rejonem Raciborza i przemieściła się w okolice Trzebinii. Wystąpił wtedy grad o maksymalnej średnicy 6,5 cm w Tychach (ESWD 2014). Pokazany na ryc. 2 BWER pojawił się 8 minut po pierwszym raporcie o dużym gradzie. Natomiast sygnałem, który pojawił się najwcześniej był WER – 12 minut przed pierwszym raportem. Należy zaznaczyć, że na rycinie 2 najwyższe odbiciowości znajdują się głównie na wysokościach 5 – 9km, co także świadczy o znacznej sile prądu wstępującego. Momentami odbiciowość przekraczająca 60 dBZ sięgała do wysokości 7 km. Ponadto należy wskazać, iż tak silna odbiciowość znajduje się w obrębie rozległego nawisu, także dobrze widocznego na ryc. 2.



Ryc. 1. (a) Radarowy obraz superkomórki burzowej na wysokości 1, 4, 7, 10 i 13 km AGL i (b) pionowe przekroje wzdłuż odcinka AB (górny rysunek) i odcinka CD (dolny rysunek). Odbiciowości podane w dBZ (Moller 2001, za: Chisholm i Renick 1972).

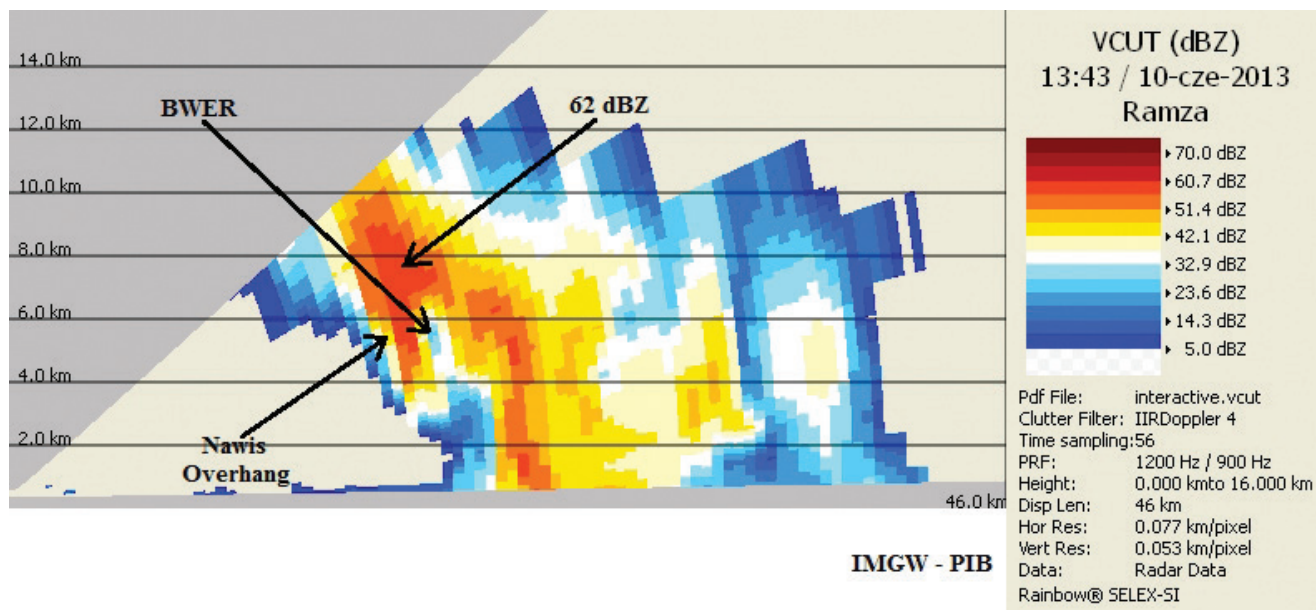
Fig. 1. Radar plan view of a supercell storm at 1, 4, 7, 10 and 13 km AGL, and (b) vertical sections of the storm along section A-B (top) and C-D (bottom). Reflectivities are in dBZ (Moller 2001, from Chisholm and Renick 1972).

Kolejnym analizowanym przypadkiem jest bezprecedensowa superkomórka, która wystąpiła w dniu 15.08.2008r. Superkomórka ta spowodowała serię trąb powietrznych w woj. opolskim, śląskim i łódzkim (co najmniej 4 przypadki), co najmniej 2 osoby poniosły śmierć i ponad 50 zostało rannych. W pasie przejścia trąb wystąpiły także ogromne straty materialne. Maksymalna siła trąb oceniana jest na F3 w skali Fujity i T7 w skali Torro. O wyjątkowości tego przypadku świadczy nie tylko sama siła trąb powietrznych, lecz także ich maksymalna średnica (do 800 m) oraz łączna długość pasa zniszczeń, (ok. 115 km) (Bebłot i in. 2010, ESWD 2014). Od momentu jej powstania, superkomórkę charakteryzowały sygnatury świadczące o jej sile. BWER pojawił się 16 minut przed zejściem pierwszej trąby powietrznej. Jeszcze wcześniej burza zmieniła trajektorię i wytworzyła „hook echo”.

Analizie poddano także pionową strukturę superkomórki z 2008 roku. Obrazy odbiciowości z wysokości 1, 4, 7, 10 i 13 km zestawiono z pionową strukturą odbicio-

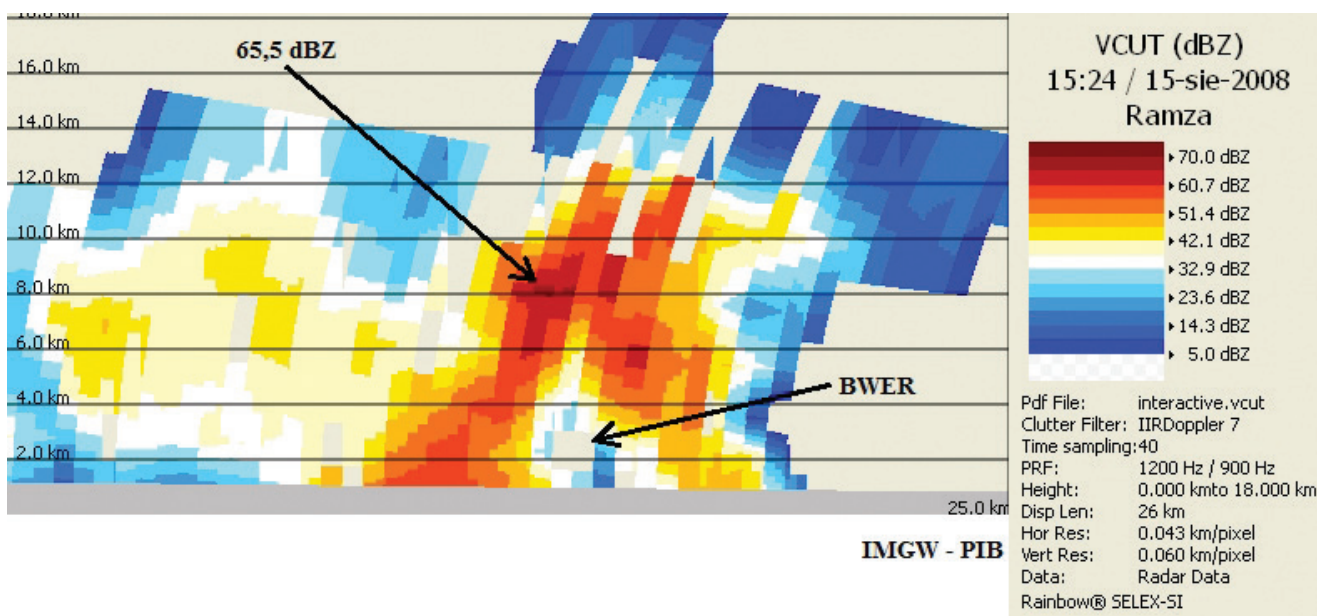
wości przedstawioną przez Chisholma i Renicka (1972) (ryc. 4). W przypadku tej superkomórki, na wysokości 1 i 4 km widoczna jest wyraźna sygnatura „hook echo”, przy czym na 4 km charakterystyczny hak próbuje się „domknąć”, jak ma to miejsce w przypadku cytowanej ryciny. Na wysokości 7 km w otoczeniu obszaru o słabszej odbiciowości (miejsce występowania mezocyklonu) znajduje się obszar o wyższej odbiciowości. Na rycinie 4 jest podobnie, z tym, że w strukturze przedstawionej przez Chisholma i Renicka (1972) obszar występowania mezocyklonu jest całkowicie wolny od odbiciowości, podczas gdy w badanej superkomórce odbiciowość występuje. Jest ona jednak wyraźnie mniejsza w stosunku do obszaru ją otaczającego. Duże podobieństwa pomiędzy strukturami widać natomiast w przypadku odbiciowości na wysokości 10 i 13 km. Najwyższą odbiciowość zanotowano bezpośrednio nad mezocyklonem, przy czym na wysokości 13 km jej wartości są niższe.

W przeciwieństwie do poprzedniej superkomórki, kolejny przypadek (14.07.2012 r.), mimo iż podobnie jak poprzedni przyniósł trąby powietrzne (o nieco tylko mniejszej sile), był znacznie mniej efektywny. Przede wszystkim BWER był znacznie słabiej rozwinięty i sięgnął zaledwie 2 km (ryc. 5). Mimo to trąby powietrzne (3 przypadki) wyrządziły znaczne szkody, zwłaszcza w lasach na obszarze Borów Tucholskich. Pozostawiły łączny pas zniszczeń o długości około 70 km i maksymalnej szerokości 625 m, powodując istotne zniszczenia w drzewostanie, infrastrukturze oraz zabijając 1 osobę



Ryc. 2. Przekrój pionowy przez superkomórkę z dobrze rozwiniętą sygnaturą BWER przemieszczającą się na zachód od Wodzisławia Śląskiego. Radar Ramża 10 czerwca 2013. Odbiciowości wyrażone w dBZ.

Fig. 2. Vertical cross-section of the supercell storm moving west of Wodzisław Śląski including well-developed BWER signature. Radar Ramża, June 10 2013. Reflectivities are in dBZ.



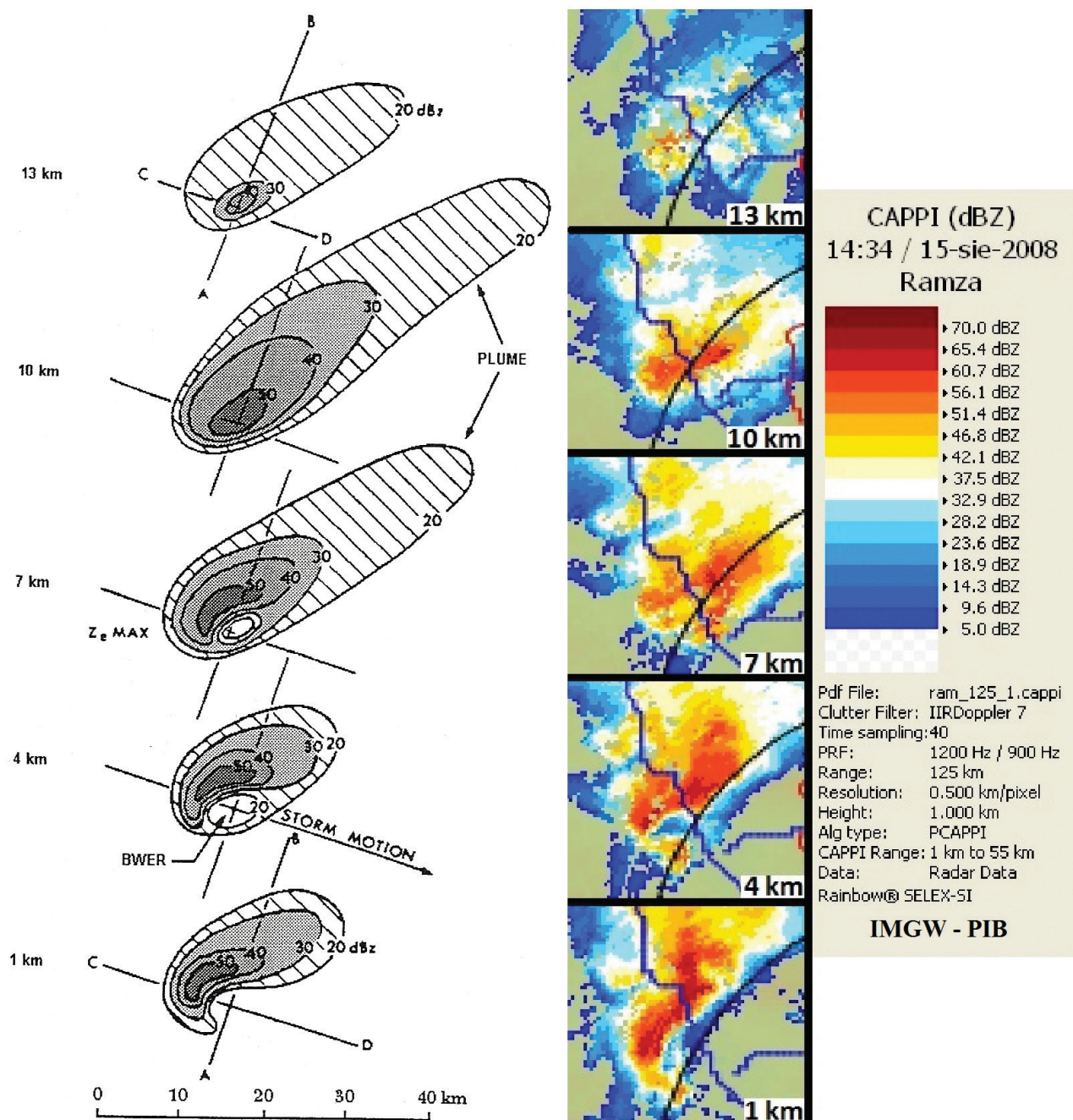
Ryc. 3. Przekrój pionowy przez superkomórkę przemieszczającą się na pograniczu woj. opolskiego i śląskiego. Przekrój zawiera najlepiej rozwinięty przypadek sygnatury BWER oraz najwyższą wartość odbiciowości zawieszoną nad ziemią. Odbiciowości podano w dBZ. Radar Ramża, 15.08.2008r.

Fig. 3. Vertical cross-section of the supercell storm moving through a border of opolskie and śląskie regions. The section contains the best developed BWER signature and the highest reflectivity value aloft. Radar Ramża, August 15 2008. Reflectivities are in dBZ.

i raniąc 7. Czas trwania tej komórki wyniósł około 7 godzin podczas gdy trąby z nią związane trwały przez około 1 godzinę i 15 minut (Walczakiewicz i Taszarek, 2014). Przyczyną tak słabego rozwoju obszaru słabej odbiciowości może być niewielki rozmiar superkomórki (zwłaszcza jej nisko usytuowany wierzchołek), która, jak piszą Walczakiewicz i Taszarek (2014) przemieszczała się w środowisku umiarkowanej niestabilności termodynamicznej i silnym, dolnym, pionowym uskoku wiatru.

Echo radarowe w kształcie haka – „hook echo”

„Hook echa i inne charakterystyczne struktury obrazu radarowego są bezpośrednim rezultatem cyrkulacji mezocyklonalnej w superkomórce” (Doswell i Burgess 1993). Jak pisze Markowski (2002) „hook echo” uważane jest za najlepiej rozpoznaną horyzontalną cechę obrazów radarowych związanych z superkomórkami. Sygnatura ta stanowi rozszerzenie echa radarowego



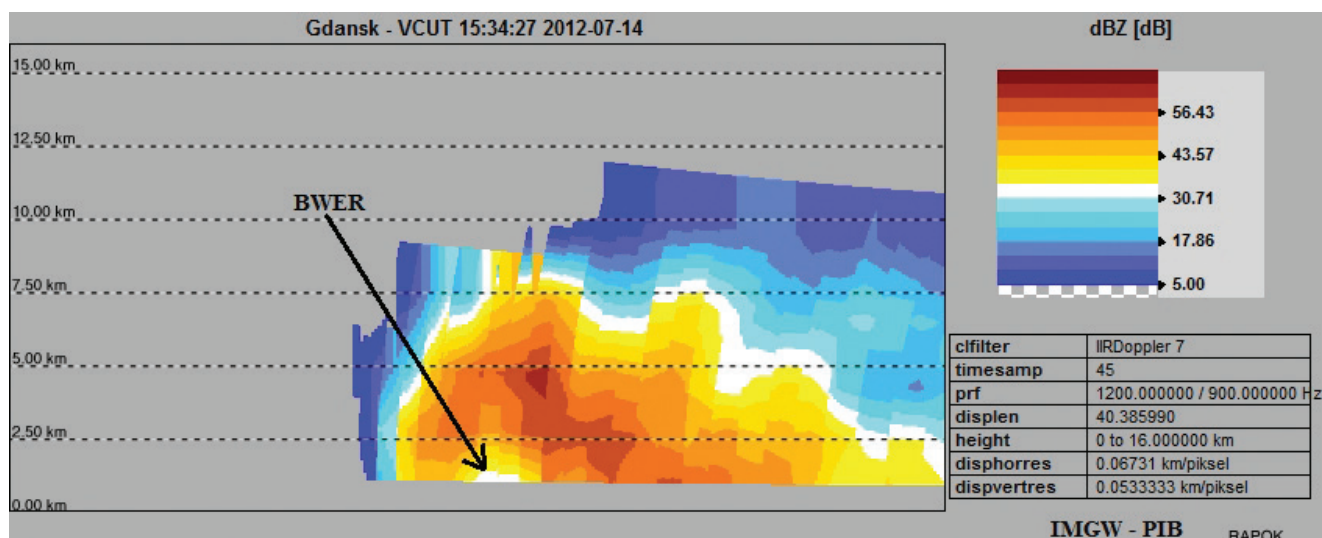
Ryc. 4. Porównanie pionowej struktury odbiciowości burzy przedstawionej przez Chisholma i Renicka (1972) – A ze strukturą burzy z 15.08.2008 – B.
 Fig. 4. Vertical reflectivity storm structure comparison between Chisholm and Renick's (A) and the August 15th 2008 Polish supercell (B).

na niskich poziomach, w prawym, tylnym boku superkomórek burzowych.

„Hook echo” przybiera różne formy, nie zawsze przypominające klasyczny hak, od którego echo wzięło swą nazwę. Zawsze jednak kształt echa nawiązuje do cyrkulacji mezocyklonalnej, panującej w superkomórce, której skutkiem jest formowanie się tej sygnatury. Fujita (1973) wyróżnił pięć odmian „hook echa” (ryc. 6).

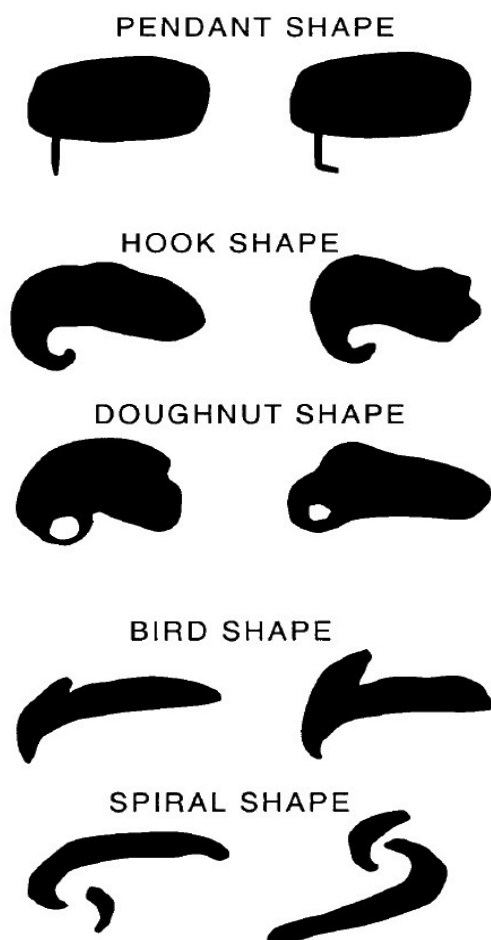
Sygnatury „hook echo” poszukiwano na obrazach PPI z najniższej elewacji. Na 9 analizowanych super-

komórek, 6 z nich cechowało „hook echo”. Najlepiej wykształconym przypadkiem tej sygnatury jest opisany wyżej przypadek z 15.08.2008r. Rozwój „hook echa” w tej superkomórce rozpoczął się ok. 14:04. 10 minut później pojawiło się „hook echo” o odmianie „pendant”, które rozwijało się nadal, by o 14:54 przyjąć formę widoczną na ryc. 7. Sygnaturę tę przedstawiono na tle sieci drogowej, by pokazać, w której części sygnatury znalazła się trąba powietrzna (w tym miejscu o największej średnicy). Trąba przeszła dokładnie na skrzyżowaniu autostrady A4 z drogą krajową 88 – Węzeł Nogowczyce. Od tego



Ryc. 5. Przekrój pionowy przez superkomórkę przemieszczającą się w rejonie Sztumu. Sygnatura BWER znajduje się na wysokości 0 – 2 km. Radar Gdańsk 14.07.2012r.

Fig. 5. Vertical cross-section of the supercell storm moving in a Sztum area, including BWER signature between 0 and 2 km. Radar Gdańsk, July 14 2012. Reflectivities are in dBZ.



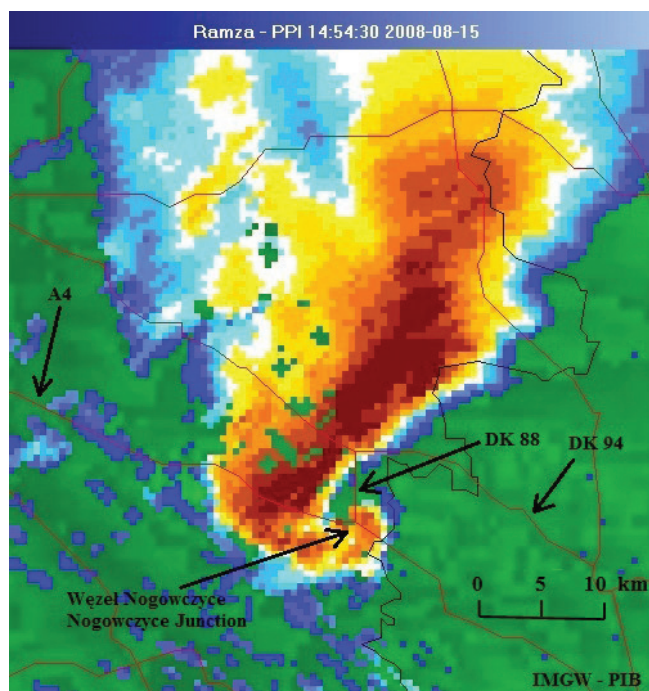
Ryc. 6. Pięć odmian kształtu „hook echo” (Markowski 2002, za: Fujita (1973)).

Fig. 6. Fujita introduced five variations on the shapes of hook echoes (Markowski (2002), from: Fujita (1973)).

momentu sygnatura „hook echo” o klasycznej odmianie „hook” występuje już do momentu wyjścia superkomórki poza zasięg dopplerowskiego skanowania radaru w Ramży (125km). Istotnym faktem jest, że „hook echo” powstało około pół godziny przed zejściem pierwszej trąby powietrznej, co pokazuje, że sygnatura ta może być cechą wskaźnikową, sygnalizującą zagrożenie. Jeszcze przed utworzeniem się „hook echa”, o 14:04 stała się widoczna odchylna trajektoria tej burzy, dając sygnał, iż jest ona superkomórką.

Głównym zagrożeniem kolejnej badanej superkomórki także była trąba powietrzna, jednak w przeciwieństwie do poprzedniego przypadku, ta superkomórka wytworzyła tylko jedną, stosunkowo krótko trwającą trąbę; sama burza także trwała nieporównywalnie krócej. Długość toru trąby wyniosła około 14 km, przy czym wyrządziła ona szkody na odcinku o długości około 13,4 km i szerokości ok. 500 m (Bebłot i in. 2008). „Hook echo”, jakie się w tym przypadku pojawiło, miało odmianę „doughnut” (ryc. 8). Pojawiło się ono jednak bardzo późno – około 10 minut przed zejściem trąby. W porównaniu z poprzednim przypadkiem, w tej superkomórce trąba powietrzna pojawiła się znacznie wcześniej, licząc od momentu powstania samej superkomórki. Tego typu przypadki, w których superkomórki trwają krótko i dają krótko trwające zjawiska są o wiele trudniejsze do prognozowania niż przypadki, w których superkomórki trwają długo, podobnie jak groźne zjawiska z nimi związane.

Ostatnim analizowanym przypadkiem superkomórki, w którym stwierdzono występowanie „hook echa” była superkomórka, która przeszła przez zachodnią i północną część woj. śląskiego 19.08.2013r. Był to zarazem przypadek najlepiej widocznej odmiennej trajektorii superkomórki, szczegółowo opisaną w dalszej części opracowania. Superkomórka ta nie przyniosła (oprócz wyładowań atmosferycznych) żadnych innych zagrożeń.



Ryc. 7. Położenie „hook echa” na tle sieci drogowej i granicy woj. opolskiego i śląskiego. PPI 0,5°, radar Ramza, 15.08.2008, godz. 14:54. Skala barw jak w ryc. 5. Trąba przeszła dokładnie nad węzłem Nogowczyce.

Fig. 7. Hook echo location in relation to the main roads and the border of opolskie and śląskie regions. PPI 0,5°, radar Ramza, 15.08.2008r, 14.54. Tornado crossed the Nogowczyce junction.

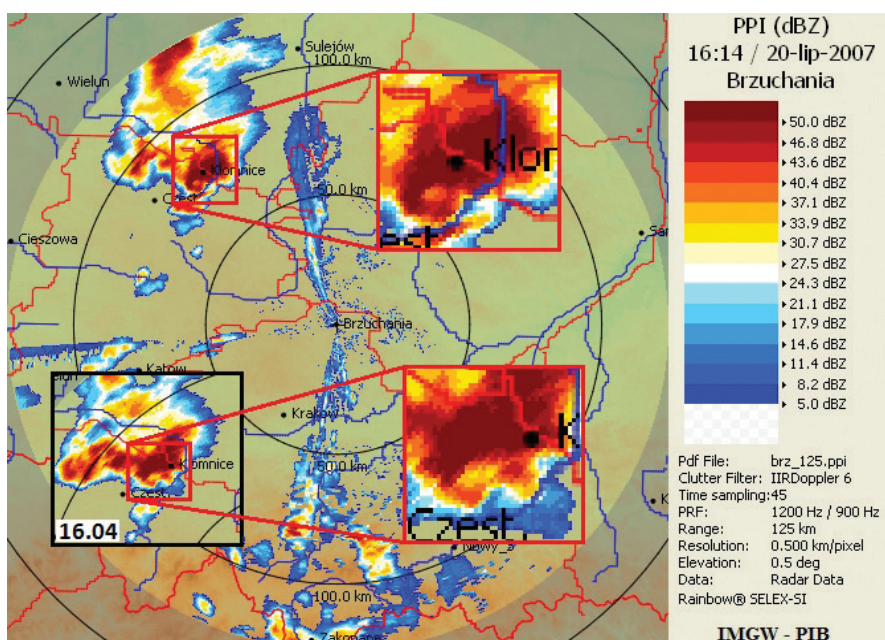
„Hook echo” (odmiany „pendant”) rozwinęło się dwukrotnie – o 16:03 i o 16:23 (ryc. 9). O istnieniu mezocyklonu wizualnie świadczyła obecność chmury stropowej (*ang. wall cloud*) o charakterystycznej stożkowej podstawie, w której autor stwierdził rotację. Ten przypadek pokazuje, iż nie każda superkomórka, wykazująca charakterystyczne cechy na obrazach radarowych cechuje się również występowaniem zagrożeń. Rozwój i występowanie zagrożeń determinują warunki, w jakich superkomórka się tworzy.

Odmienna trajektoria superkomórki burzowej

„Nie wszystkie superkomórki odchylają się w sposób znaczący od średniego wiatru, dlatego też odchylenie ruchu nie jest wymagane dla rozwoju głębokiego, trwałego mezocyklonu, zwłaszcza w sytuacji zakrzywionego hodografu” (Doswell, Burgess 1993). Davies i Johns (1993) użyli danych obserwacyjnych do zmierzenia odmiennych trajektorii superkomórek. W wyni-

ku przeprowadzonych badań, doszli oni do wniosku, że cykloniczne superkomórki poruszają się 20° w prawo i z 85% średnią prędkością wiatru dla średnich prędkości wiatru większych niż 15 m/s, w innych przypadkach ruch odbywa się około 30° w prawo, z 75% średnią prędkością wiatru. Metoda ta działa dobrze w przypadku wielu zdarzeń, jednak nie jest dobra w przypadku przepływu nad powierzchnią Ziemi z NW oraz w przypadku wielu superkomórek HP – wysokoopadowych (*ang. High Precipitation*) (Bunkers i in. 1998).

Pomimo tego, że Doswell i Burgess (1993) sugerują, że odmienna trajektoria superkomórek nie jest warunkiem koniecznym do ich rozpoznania, wydaje się, iż można tą cechę traktować jako cechę wskaźnikową, gdyż we wszystkich badanych przypadkach superkomórek, stwierdzono ich odmienną trajektorię. Jednak nie zawsze była ona dobrze widoczna, jak np. w dniach 10.06 i 18.06.2013r. W tym ostatnim przypadku, bardziej niż odchyloną trajektorię, widać jej wolniejszy ruch. Zdarza się, że odchyloną trajektorię staje się widoczna bardzo późno. Problem pojawia się także w dostrzeganiu odmiennego toru ruchu, gdyż w przypadku superkomórek wbudowanych w większy układ burzowy oraz w przypadku krótkiego czasu trwania komórek sąsiadujących, można być pozbawionym punktu odniesienia. Ciekawym przypadkiem jest superkomórka z 14.07.2012r, opisana już przy okazji sygnatury BWER. Zanim pojawiła się w niej pierwsza trąba powietrzna, superkomórka istniała już kilka godzin, w czasie których widoczny był jej odchylony tor ruchu, umożliwiając jej rozpoznanie. Oprócz trajektorii, przed zejściem trąby powietrznej, pojawiło się jeszcze „hook echo” (35 minut przed zejściem pierwszej trąby), jednak było ono widoczne tylko na jednym skanie. Następnie przez kolejne 70 minut na obrazie ra-



Ryc. 8. „Hook echo” o odmianie „doughnut”, przypominające wraz z obszarem słabszej odbiciowości w miejscu występowania mezocyklonu „oko cyklonu”, ze słabym sygnałem wewnątrz. Towarzyszyło superkomórce z 20.07.2007r. PPI (0,5°), radar Brzuchania.
Fig. 8. Hook echo (doughnut shape) associated with the supercell from July 20 2007. PPI (0,5°), radar Brzuchania.

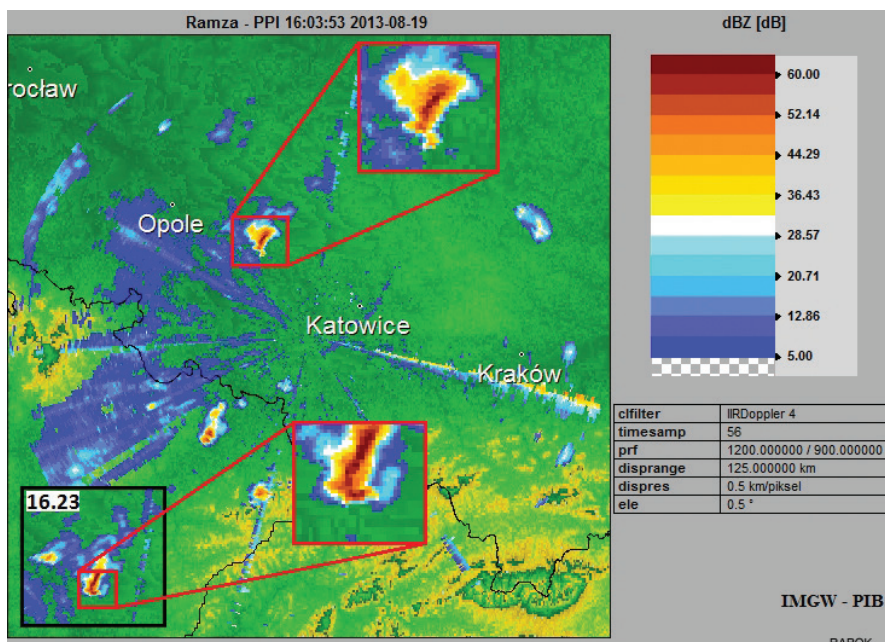
darowym nie można było dostrzec żadnych innych charakterystycznych cech, oprócz wspomnianej odmiennej trajektorii. Biorąc pod uwagę, że wszystkie badane superkomórki cechowała odmienna trajektoria, oraz to, że czasem jest ona jedyną cechą umożliwiającą jej identyfikację, wydaje się, iż może być ona traktowana jako cecha wskaźnikowa, co nie zwalnia jednak z poszukiwania innych charakterystycznych sygnatur. Detekcja tej cechy możliwa jest zarówno na obrazach PPI – Plan Position Indicator – przekrój stożkowy – rozkład odbiciowości wzdłuż określonej elewacji (Tuszyńska 2011), jak i CMAX – Maximum Display – rozkład maksymalnej odbiciowości w rzucie na jedną płaszczyznę (Tuszyńska 2011). Produkt CMAX jest udostępniany publicznie na bieżąco.

Rozpoznanie zagrożenia gradem

Technika Lemona

Grad jest zjawiskiem stosunkowo najłatwiejszym do rozpoznania spośród innych groźnych zjawisk. Najlepiej się do tego nadaje technika Lemona, polegająca na rozpoznaniu odpowiednio wysokiej wartości odbiciowości na znacznej wysokości nad ziemią (Burgess i Lemon 1990). W sprzyjających warunkach grad jest prawdopodobny w momencie, gdy odbiciowość w burzy przekracza 50 dBZ na wysokości większej niż 8 km nad poziomem gruntu (Burgess i Lemon 1990), zwłaszcza przy obecności na środkowych poziomach nawisów i dyslokacji wierzchołka (*ang. echo top displacement*). Najbardziej groźne w skutkach opady gradu są powiązane z dobrze rozwiniętymi, superkomórkowymi BWER (Moller 2001).

Przypadkiem superkomórki, w której powstał grad o największej średnicy (ok. 10 cm) jest superkomórka, która rozwinęła się w dniu 10.06.2010r. na terenie woj. świętokrzyskiego. Superkomórka ta, prócz odchylonej trajektorii nie posiadała ani obszarów słabego echa ani „hook echa” ani nawet znacznych wartości odbiciowości. Jedyną możliwością, która pozwalała przewidzieć zagrożenie opadem gradu była technika Lemona. Na ryc. 10 przedstawiono przekrój pionowy obrazu odbiciowości, na którym widać wartość 50 dBZ, przekraczającą wysokość 8 km (czarna linia). Pomimo tego, że zarówno wartość odbiciowości, jak i wysokości są wartościami granicznymi, ledwo mieszczącymi się w kryterium przedstawionym przez Lemona, zagrożenie gradem w przypadku tej superkomórki okazało się znaczące. Za pomocą techniki Lemona udało się wykryć zagrożenie gradem we



Ryc. 9. Superkomórka z „hook echem” odmiany „pendant”, przemieszczająca się na północ od Toszka. Radar Ramża, PPI (0,5°), 19.08.2013r.

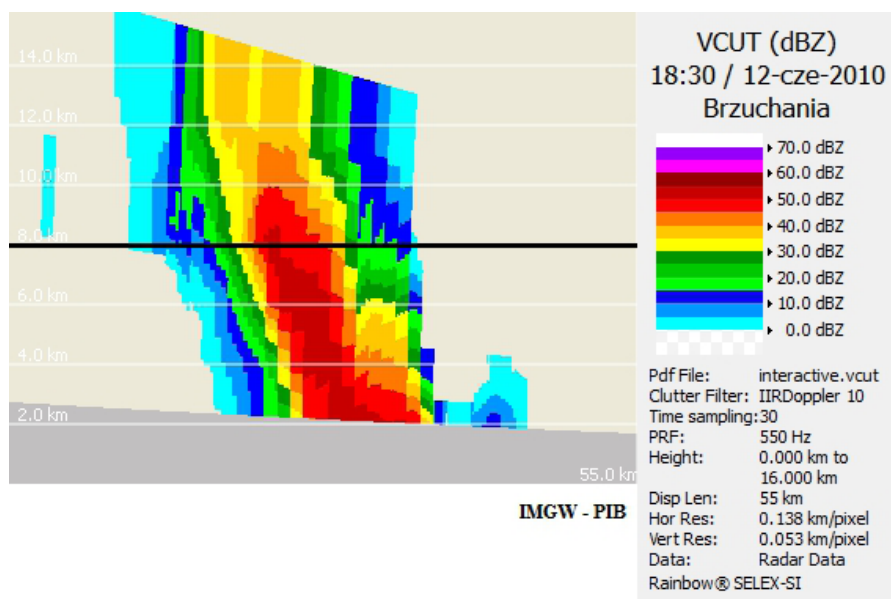
Fig. 9. Supercell with the hook echo (pendant shape) moving north of Toszek. PPI (0,5°), radar Ramża, August 19, 2013.

wszystkich badanych superkomórkach, w których grad był głównym zagrożeniem. Bardzo dobrym tego przykładem jest prezentowana na rycinie 2 superkomórka, która wystąpiła w dniu 10.06.2013r. Spełnia ona nie tylko kryterium Lemona, lecz zawiera także BWER, nawis i dyslokację wierzchołka. Także opady dużego gradu w obrębie superkomórek, których głównym zagrożeniem były trąby powietrzne mogły zostać wykryte przy pomocy techniki Lemona. Dotyczy to zwłaszcza przypadku z 15.08.2008, gdzie zarówno odbiciowość, jak i wysokość znacząco przekroczyły przedstawione minima (ryc. 3).

Odbiciowość przy ziemi

Echo radarowe jest mapą ekwiwalentu czynnika odbiciowości Z_e (wyrażonym jako dBZ) oraz jest generalną miarą rozmiaru hydrometeorów. Zależy od koncentracji, fazy (woda, lód, opady mieszane) i kształtu (Knight i Knight 2001). Można więc wnioskować, że im większa będzie średnica gradu oraz jego koncentracja, tym silniejsza będzie odbiciowość, na którą wpływ ma także obecność opadów deszczu towarzyszących gradowi. Nie można zatem utożsamiać wprost wartości odbiciowości ze średnicą gradu. Jednak jak twierdzi Witt (1996), znaczne wartości odbiciowości są sygnałem ostrzegawczym, wskazującym na to, iż odbiciowości na niskich poziomach mogą być przejawem trwających incydentów gradowych. „Wiosenne burze powstające w południowej części równin prawie zawsze dają grad, gdy odbiciowość na niskiej elewacji osiąga 60 dBZ lub więcej” (Witt 1996).

Spośród wszystkich superkomórek związanych z incydentami gradowymi (4 przypadki), kryterium przedstawione przez Witta (1996) spełniały trzy. Badano przy



Ryc. 10. Pionowy przekrój superkomórki związanej z wystąpieniem gradu o średnicy ok. 10 cm w woj. świętokrzyskim. 12.06.2010r, radar Brzuchania.

Fig. 10. Vertical cross-section of the supercell associated with the hail 10-cm in diameter in świętokrzyskie region. June 12, 2010, radar Brzuchania.

tym odbiciowość na PPI z najniższej elewacji. Co ciekawe, kryterium tego nie spełniała superkomórka, która spowodowała wystąpienie gradu o największej średnicy (największa wartość odbiciowości w tym przypadku wyniosła 55 dBZ, w dodatku pojawiła się tylko na jednym skanie). Najwyższą odbiciowość spośród badanych superkomórek zarejestrowano 10.06.2013r. Wyniosła ona 68,5 dBZ, zaś superkomórka, która ją wytworzyła, spowodowała opad gradu o maksymalnej średnicy 6,5cm. Można zatem wnioskować, iż nie zawsze opadom dużego gradu towarzyszy występowanie odbiciowości przekraczających 60 dBZ.

Przydatność sygnatur przy nowcastingu – ultrakrótkoterminowym prognozowaniu do 6 godzin

W pracy przeanalizowano wszystkie dostępne obrazy radarowe superkomórek, które spowodowały groźne zjawiska i wszystkie raporty na ich temat dostępne w bazie ESWD (2014). W tabeli 1, zestawiono rodzaje i daty zjawisk oraz liczbę raportów. Liczba raportów nie oznacza liczby zjawisk np. trąb powietrznych. Na podstawie analizy obrazów radarowych, w kolejnych kolumnach spisano rodzaj sygnatury radarowej oraz godzinę pojawienia się jej po raz pierwszy. Moment, kiedy sygnatura pojawia się po raz pierwszy, to czas, w którym była ona już na tyle dobrze wykształcona, aby nie było możliwości pomyłki fotointerpretacyjnej. Oznacza to, że bardzo słabo wykształcona sygnatura mogła pojawić się jeszcze nieco wcześniej, niż podano to w tabeli. Godziny pojawienia się sygnatur po raz pierwszy to godziny spisane z obrazów radarowych, które oznaczają początek skanowania. Należy więc dodać czas skanowania do czasu pierwszego

pojawienia się danej sygnatury, by otrzymać godzinę, w której możliwe było po raz pierwszy zobaczenie danej sygnatury przez synoptyka. Czas ten jest różny w zależności od produktu radarowego, na którym się daną sygnaturę rozpoznaje. W przypadku produktu PPI jest to kilkadziesiąt sekund, zaś w przypadku przekrojów pionowych (produkt VCUT), gdzie musi zostać wykonany skan objętościowy, jest to około 4 minut. W kolumnie rodzaju zjawiska zastosowano skrót LT oznaczający technikę Lemona. W kolejnych dwóch kolumnach podano spisane z bazy ESWD (2014) godziny pierwszych raportów, jakie wystąpiły w czasie trwania danej superkomórki oraz ich niedokładność czasową. Przedostatnia kolumna jest kolumną najważniejszą z punktu widzenia oceny przydatności obrazów rada-

rowych przy nowcastingu. Przedstawia ona wyznaczoną różnicę czasową między pojawieniem się danej sygnatury radarowej, a pierwszym raportem o groźnym zjawisku. Czasy ze znakiem „-” oznaczają, że dana sygnatura radarowa pojawiła się później niż raport z pierwszego groźnego zjawiska. W ostatniej kolumnie podano czas, jaki upłynął między pojawieniem się danej sygnatury radarowej, a ostatnim raportem o groźnym zjawisku. Czasy podane w nawiasach oznaczają, że pod uwagę wzięto nie czas z raportu z bazy ESWD (2014), lecz czas nadejścia burzy nad miejsce pierwszego raportu. Czas jednak został ustalony w oparciu o dane radarowe, ze względu na dużą rozbieżność czasową między godziną podaną w pierwszym raporcie, a danymi radarowymi.

Analiza różnic w czasie pomiędzy sygnaturami radarowymi, które pojawiły się w przypadku danej superkomórki jako pierwsze a odnoszącymi się do niej pierwszymi raportami o zniszczeniach, pozwala na stwierdzenie, iż średnio czas ten wynosi 16 minut. Wydaje się, iż jest to stosunkowo krótki czas, jednak przy sprawnym wydawaniu ostrzeżeń i ich przekazywaniu ludności (przy pomocy mediów i telefonii komórkowej) umożliwia dotarcie z ostrzeżeniami nawet do miejscowości, które przez daną superkomórkę mogą zostać uszkodzone jako pierwsze. Miejscowości leżące dalej na potencjalnym szlaku superkomórki, mają odpowiednio więcej czasu między pierwszym pojawieniem się sygnatury a nadejściem zagrożenia. Istotna jest tutaj analiza ostatniej kolumny w tabeli. Prezentuje ona czas między pojawieniem się danej sygnatury radarowej po raz pierwszy (umożliwiającej rozpoznanie zagrożenia) a ostatnim raportem o zniszczeniach, oznaczającym moment zaniku zjawiska. Między pojawieniem się pierwszych sygnatur radarowych a ostatnimi raportami upływały średnio 102 minuty. Okazuje się, że nawet w przypadku

Tabela 1. Przydatność sygnatur radarowych przedstawiona za pomocą różnicy w czasie pomiędzy pojawieniem się charakterystycznych sygnatur radarowych a wystąpieniem danego groźnego zjawiska. Czasy podano w UTC. Opracowano na podstawie danych radarowych i bazy danych ESWD (2014).

Table 1. Usefulness of the radar signatures in nowcasting, presented as the time between the moment the radar signature appeared for the first time and the time of the threat (e.g. tornado). Times in UTC. Based on the radar data and the European Severe Weather Database (ESWD)

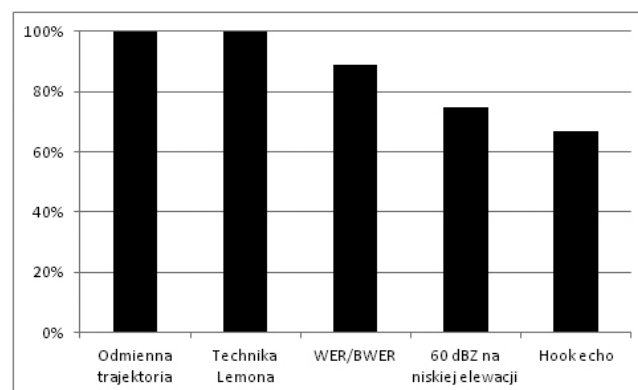
| Data Date | Rodzaj zjawiska Phenomenon | Liczba raportów danego zjawiska z danej superkomórki Number of reports of the given phenomenon during the given supercell | Rodzaj sygnatury radarowej Radar signature or feature | Godzina pojawienia się danej sygnatury radarowej po raz pierwszy Time the signature first appeared | Godzina wystąpienia groźnego zjawiska po raz pierwszy (pierwszy raport) Time of the severe phenomenon first occurred (first report) | Niedokładność czasowa pierwszego raportu [min] First report's inaccuracy | Czas między pierwszym pojawieniem się danej sygnatury radarowej a pierwszym raportem w godzinach Time between the signature first appeared and the last report/warning lead time in hours | Czas między pierwszym pojawieniem się danej sygnatury radarowej a ostatnim raportem w godzinach Time between the signature first appeared and the last report in hours |
|---------------|---|--|--|---|--|---|--|---|
| 20.07.2007 | Trąba powietrzna <i>Tornado</i> | 1 | Echo w kształcie haka <i>Hook echo</i> | 16:04 | 16:30 (16:15 – 16:20) | 15 | 0:11 – 0:16 | – |
| 15.08.2008 | Trąba powietrzna <i>Tornado</i> | 8 | Trajektoria <i>Trajectory</i> | 14:04 | 15:00 (14:15) | 15 | 0:56 (0:41) | 3:26 |
| 12.06.2010 | Duży grad <i>Large hail</i> | 5 – 6 | LT <i>Lemon Technique</i> | 18:20 | 18:10 | 15 | -0:10 | 0:25 |
| 03.07.2012 | Duży grad <i>Large hail</i> | 8 | WER, LT | 14:23 | 15:00 | 15 | 0:37 | 1:37 |
| 14.07.2012 | Trąba powietrzna <i>Tornado</i> | 3 | Echo w kształcie haka I raz <i>Hook echo first time</i> | 14:10 | 14:45 | 15 | 0:35 | 1:35 |
| | | | BWER | 15:20 | | | | -0:35 |
| 06/07.08.2012 | Silne porywy wiatru <i>Severe wind gusts</i> | 53 – 55 | WER | 20:43 | 22:00 (21:20) | 15 | 1:17 (0:37) | 3:52 |
| 10.06.2013 | Duży grad <i>Large hail</i> | 13 | WER, LT | 13:23 | 13:35 | 15 | 0:12 | 1:37 |
| 18.06.2013 | Duży grad <i>Large hail</i> | 15 | LT | 14:10 | 13:45 | 30 | -0:25 | 0:50 |

superkomórki z 12.06.2010r, z której pierwsze opady gradu wystąpiły zanim jeszcze radary wykryły w nich charakterystyczne sygnatury, nowcasting był możliwy, ale tylko w ograniczonym zakresie. Przypadek z 2010 roku pozwolił na uchwycenie pierwszych sygnałów na obrazach radarowych dopiero 10 minut po wystąpieniu pierwszego raportu o dużym gradzie, jednak od tego momentu, do ostatniego raportu pozostało jeszcze 25 minut. Wśród ostatnich raportów znajduje się ten, w którym ujęto grad o średnicy 10 cm w Sołtykowie (woj. mazowieckie). Upłynęło wtedy 25 minut od pojawienia się charakterystycznej sygnatury radarowej (w tym przypadku było to wystąpienie odbiciowości powyżej 50 dBZ powyżej 8 km (ryc. 10)) do momentu wystąpienia opadu gradu o średnicy 10 cm. Drugą charakterystyczną sygnaturą, jaka się wtedy pojawiła, było „hook echo”, jednak wystąpiło ono dopiero 25 minut po ostatnim raporcie. Na tych dwóch przypadkach widać, że nowcasting oparty wyłącznie o obrazy radarowe nie jest niezawodną metodą prognozowania. Zawsze problemem będzie identyfikacja obszaru, na którym po raz pierwszy wystąpi dane zjawisko. W przypadku kolejnych obszarów, wraz z upływem czasu, rośnie prawdopodobieństwo wykrycia odpowiednich sygnatur radarowych i wydania ostrzeżeń. Wzrasta także czas od wydania ostrzeżenia do nadejścia zjawiska. Daje to możliwość dotarcia z ostrzeżeniami do większej liczby ludności.

Z drugiej strony mamy do czynienia z przypadkami takimi jak superkomórki z 15.08.2008r. i z nocy z 6 na 7.08.2012r. Obydwa te przypadki to przykłady niezwykle silnych, długo trwających superkomórek, dających zagrożenie przez długi okres czasu. W obydwu sytuacjach rozpoznanie sygnatur dało możliwość przewidzenia zagrożenia kilkadziesiąt minut przed jego wystąpieniem (patrz tab. 1). W przypadku superkomórki z roku 2008 pierwszą cechą była odchylona trajektoria a następnie 10 minut później pojawiło się „hook echo”. Obydwa cechy pojawiły się na ponad pół godziny przed wystąpieniem pierwszej trąby powietrznej. Drugi wspomniany przypadek superkomórki to zagrożenie silnymi porywami wiatru, niezwiązanymi z trąbą powietrzną (świadczą o tym szkody pozostawione przez wiatr). W tym przypadku pierwsza sygnatura (WER) pojawiła się 37 minut przed pierwszymi zniszczeniami. Obydwa przypadki potwierdzają, że silne, długo trwające superkomórki, stwarzające zagrożenie przez dłuższy czas (powodując tym samym większe szkody) pozwalają na lepsze ich prognozowanie w oparciu o rozpoznawanie charakterystycznych sygnatur i cech superkomórek na obrazach radarowych.

Procentowy udział liczby superkomórek charakteryzujących się daną sygnaturą w stosunku do ogólnej liczby superkomórek powodujących zagrożenie sygnalizowane przez daną sygnaturę przedstawiono na rycinie 11. Sygnatury WER/BWER, „hook echo” oraz odchylona trajektoria sygnalizują jedynie samą obecność superkomórki (a nie konkretne zagrożenie z nią związane), więc jako 100% przyjęto dla nich ogólną liczbę badanych superkomórek (9 przypadków). Z kolei dla techniki Lemona (Burgess i Lemon 1990) i kryterium Witta (1996),

które sygnalizują obecność dużego gradu jako 100% przyjęto ilość superkomórek generujących wyłącznie zagrożenie gradem (4 przypadki).



Ryc. 11. Procentowy udział liczby superkomórek z daną sygnaturą radarową w stosunku do ogólnej liczby superkomórek powodujących zagrożenie sygnalizowane przez daną sygnaturę. Fig. 11. Percentage of the supercells with radar signature in relation to all supercells caused threat, indicated by the given signature.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych analiz obrazów radarowych z wybranych superkomórek stwierdzono, że wszystkie opisywane wcześniej w literaturze sygnatury się pojawiły i zostały poprawnie rozpoznane. Najczęściej pojawiającą się cechą superkomórek jest ich odmienna trajektoria. Stwierdzono ją we wszystkich analizowanych przypadkach. „Hook echo” pojawiło się w 6 przypadkach na 9 analizowanych superkomórek. Odbiciowość powyżej 50 dBZ na wysokości przekraczającej 8 km (rozpoznanie zagrożenia gradem, przy pomocy techniki Lemona) wystąpiła we wszystkich przypadkach superkomórek, którym towarzyszył grad. Sygnatury WER i BWER, stwierdzono w 8 superkomórkach na 9 badanych, stąd powinny być one uważane za ważny wskaźnik przy nowcastingu.

Po przeprowadzonej analizie stwierdzono, iż nie można utożsamiać stopnia rozwinięcia sygnatur z siłą zjawisk zachodzących w burzy. Stopień rozwinięcia sygnatury (np. BWER) zależy bowiem nie tylko od natężenia zjawisk, ale także od warunków w jakich tworzy się burza. Jeśli superkomórka utworzy się w warunkach niskiej bądź umiarkowanej chwiejności termodynamicznej, będzie słabiej rozwinięta w pionie, przełoży się to na słabsze rozwinięcie sygnatury BWER, co nie znaczy jednak, że zjawisko (np. trąba powietrzna) nie będzie groźne. W przypadku gradu, superkomórka może spełniać dolne granice wyznaczonego kryterium odbiciowości i wysokości (technika Lemona) a mimo to zagrożenie gradem będzie znaczne. Przy ocenie radarowego obrazu danej burzy należy więc uwzględniać także warunki, w jakich dana burza się tworzy.

W przypadku detekcji zagrożenia wystąpieniem gradu najbardziej przydatna okazuje się technika Lemona (rozpoznane wszystkie przypadki gradu). Pomocne mogą

być także obszary słabego echa oraz obszary odbiciowości przekraczającej 60 dBZ na niskiej elewacji. Przyjmuje się, że im wyżej znajduje się maksimum odbiciowości i im wyżej sięga wierzchołek burzy, tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia z jej strony zagrożeń. Wysokość na której znajduje się wierzchołek burzy może być sygnałem ostrzegawczym (zwłaszcza jeśli na znaczną wysokość sięgają wysokie wartości odbiciowości).

Analizując czasy między pojawieniem się sygnatur a wystąpieniem zagrożenia można stwierdzić, iż przypadki długo trwających superkomórek, generujących zagrożenia przez dłuższy czas, dają oznaki wcześniej, niż przypadki superkomórek trwających krótko. Średnio czas między pojawieniem się charakterystycznej sygnatury lub cechy po raz pierwszy a początkiem występowania zagrożenia wyniósł 16 minut, zaś między pierwszym pojawieniem się charakterystycznej sygnatury a momentem zaniku zagrożenia – 102 minuty. Widać więc, że na ogół sygnatury pojawiają się zanim pojawi się zagrożenie, można zatem traktować je jako ostrzeżenie przed zagrożeniami. Jednak w niektórych przypadkach superkomórki wykazują charakterystyczne sygnatury lub cechy już po wystąpieniu pierwszych szkód. Problematicznym pozostaje więc obszar tworzenia się i początkowej aktywności danej burzy, gdyż na tym etapie czasami nie daje ona oznak w postaci charakterystycznych sygnatur.

Podziękowania

Niniejszy artykuł powstał w oparciu o pracę licencjacką autora, której promotorem był dr Artur Widawski, któremu serdecznie dziękuję za cenne wskazówki podczas przygotowywania pracy oraz za pomysł opublikowania jej najważniejszych założeń w postaci niniejszego artykułu. Autor składa także serdeczne podziękowania dyrekcji IMGW-PIB za udostępnienie danych radarowych.

Literatura

Literatura

- BEBŁOT G., HOŁDA I., RORBK K., 2008. *Trąba powietrzna w rejonie Częstochowy 20 lipca 2007 r.* [W:] Ekstrema pogodowe w Polsce. Monografie IMGW, s. 23 – 40
- BEBŁOT G., DUBIEL B., KONARSKI J., TUSZYŃSKA I., 2010. *Groźne zjawiska atmosferyczne na terenie Polski w dniu 15 sierpnia 2008 r.* [W:] Maciejewski M., Ostojski M.S.(red.) Rzyko w problemach zagrożeń. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, s. 8 – 33.
- BUNKERS M.J., KLIMOWSKI J.W., ZEITLER J.W., THOMPSON L.R., WEISMAN M.L., 1998. *Predicting supercell motion using hodograph techniques.* Preprints 19 Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Minneapolis, MN, s. 592 – 594.
- BURGESS D. W., LEMON L.R., 1990. *Severe thunderstorm detection by radar.* [W:] Atlas D.(red.): Radar in meteorology, American Meteorological Society, s. 619 – 627.

- CHISHOLM A.J., RENICK J.H., 1972. *The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms.* Alberta hail studies 1972, Research council of Alberta Hail Studies Rep, s. 72-2, 24-31.
- 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., Davies-Jones R., 1993, The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards. Geophys. Monogr., American Geophysical Union, No. 79, s. 573 – 582.
- DOSWELL C.A., BURGESS D.W., 1993. *Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models.* [W:] Church C., Burgess D., Doswell., Davies-Jone R., 1993: The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards, Geophys. Monogr., American Geophysical Union, No. 79, s. 161 – 172.
- DOSWELL C.A., MOLLER A.R., BROOKS H.E., 1999. *Storm spotting and public awareness since the first tornado forecasts of 1948.* Weather forecasting, 14, s. 544-577.
- FUJITA T., 1965. *Formation and steering mechanisms of tornado cyclones and associated hook echoes.* Monthly Weather Review, vol 93, No. 2, s. 67 – 78.
- FUJITA T., 1973. *Proposed mechanism of tornado formation from rotating thunderstorms.* Preprints, Eighth Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Denver, CO, s. 191–196.
- KNIGHT C.A., KNIGHT N.C., 2001. *Hailstorms.* [W:] Doswell C.A.(red.), 2001, Severe Convective Storms, American Meteorological Society, Boston, s 223 - 254.
- MARKOWSKI P.M., 2002. *Hook echoes and Rear-Flank Downdrafts: A Review.* Monthly Weather Review, Vol 130, s. 852 – 876.
- MOLLER A.R., 2001. *Severe Local Storms Forecasting.* [W:] Doswell C.A.(red.), 2001, Severe Convective Storms. American Meteorological Society, Boston.
- 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, s. 327-347.
- TUSZYŃSKA I., 2011. *Charakterystyka produktów radarowych.* Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- WALCZAKIEWICZ S., TASZAREK M., 2014. *Superkomórkowa trąba powietrzna z dnia 14 lipca 2012 r.* Materiały konferencyjne konferencji V Ogólnopolski Zlot Polskich Łowców Burz, Poznań, s. 8.
- WEISMAN M.L., KLEMP J.B., 1984. *The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally-varying wind shears.* Monthly Weather Review, 112, s. 2479 – 2498.
- WITT A., 1996. *The relationship between low-elevation WSR-88D reflectivity and hail at the ground using precipitation observations from the VORTEX project.* Preprints 18 Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, San Francisco, CA, s. 183 – 185.

Wykorzystano strony internetowe:
<http://forum.lowcyburz.pl/viewtopic.php?f=694&t=667> (dostęp: 08.12.2013).

ESWD, 2014. *European Severe Weather Database:* <http://www.essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi> (dostęp: 06.01.2014 - 05.04.2014).



Wojciech Pilorz – ukończył studia geograficzne na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, uzyskując stopień licencjusza. Obecnie jest magistrantem pierwszego roku studiów na kierunku – geografia specjalizując się w zakresie hydroklimatologii. Jest członkiem Stowarzyszenia Skywarn Polska – Polscy Łowcy Burz.
Kontakt: wojciech.pilorz@gmail.com