



Obrazy radarowe źródłem informacji o zagrożeniach meteorologicznych

Wojciech Pilorz

Igor Laskowski

Stowarzyszenie Skywarn Polska, 2017



Ryc. 1. Radar meteorologiczny we wsi Pastewnik (pow. kamiennogórski, woj. dolnośląskie). Urządzenie umieszczone jest na wieży, pod widoczną białą kopułą ochronną. Fot. W. Pilorz.

Spis treści

1. Radar meteorologiczny - definicja	4
2. Zasada działania radaru meteorologicznego	4
Pasma i rodzaje radarów	6
Radar Dopplerowski	6
Radary z podwójną polaryzacją fali	7
3. Produkty skanowania radaru	7
PPI	7
САРРІ	7
CMAX	
VIL	8
Echo Top	
Algorytmy rozpoznające zagrożenie dużym gradem	
Przekroje pionowe	9
4. Interpretacja obrazów radarowych	9
Rodzaj opadów	9
Natężenie opadu	9
Zakłócenia i ograniczenia	
Ważniejsze sygnatury radarowe w obrębie groźnych burz oraz ich cechy	
Obszary słabego echa	
Hook Echo	
Odchylona trajektoria burzy	27
Spójność "rdzenia" i czas trwania burz superkomórkowych	27
Bow Echo	
Linia szkwału	
Line Echo Wave Pattern (LEWP)	
Rear Inflow Notch (RIN)	
Mid-Altidude Radial Convergence (MARC)	
Comma echo	
Three-Body Scattered Signature/Spike (TBSS)	40
S-Signature	
Tornadic Debris Signature (TDS)	
Tornadic Vortex Signature (TVS)	

Mesoscale Convective Vortex (MCV)	. 42
Literatura	. 44

1. Radar meteorologiczny - definicja

Radar meteorologiczny to aktywne urządzenie teledetekcyjne¹ służące do monitoringu dolnej warstwy atmosfery² w określonym promieniu wokół radaru. Umożliwia ono rozpoznanie stref występowania hydrometeorów (cząstek wody powyżej określonej średnicy, w stanie ciekłym bądź stałym występujących w atmosferze) oraz przybliżonej ich koncentracji³.

Wszystkie obrazy radarowe z obszaru Polski prezentowane w niniejszym opracowaniu pochodzą z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego. Dane IMGW – PIB zostały przetworzone.

2. Zasada działania radaru meteorologicznego

Zasada działania radaru meteorologicznego opiera się o wysyłanie w ściśle określonym kierunku bardzo krótkiego, wąskiego impulsu radiowego,⁴ który docierając do hydrometeorów (kropelki wody, kryształki lodu, gradziny) "odbija się" od nich i wraca jako echo⁵ w kierunku radaru. Czas emisji impulsu radiowego jest ok. 2 tysięcy razy krótszy od czasu nasłuchu ech⁶ wzbudzanych przez hydrometeory.

Znając prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w przestrzeni,⁷ na podstawie różnicy między czasem emisji promieniowania przez radar a czasem odbioru echa możliwe jest ustalenie odległości pomiędzy radarem a badanym obiektem (krople deszczu, mżawki, płatki śniegu, krupy, gradziny). Po zakończeniu nasłuchu antena obraca się o określony kąt na kolejny azymut,⁸ a procedura emisji sygnału i nasłuchu echa powtarza się. W ten sposób wykonywany jest pełny (360°) obrót anteny radaru. Po wykonaniu pełnego obrotu antena zmienia kąt nachylenia względem powierzchni ziemi (podnosi się lub opada) i wykonuje kolejny pełny obrót.

¹ Teledetekcja – jedna z metod badań stosowana m.in. w naukach o środowisku, polegająca na rozpoznawaniu właściwości badanego obiektu na odległość np. przy pomocy fal elektromagnetycznych lub mechanicznych.
² Troposfera – Najniższa warstwa atmosfery. W umiarkowanych szerokościach geograficznych obejmuje dolne

^{9,5 – 12,5} km atmosfery (w zależności od pory roku i masy powietrza).

 ³ Koncentracja – liczebność danego obiektu jaka występuje w określonej przestrzeni. W przypadku odbiciowości
 – liczba hydrometeorów w jednostce objętości jaką skanuje radar.

⁴ Impuls radiowy – krótko trwająca emisja fali elektromagnetycznej, w przypadku radarów meteorologicznych trwająca kilka tysięcy razy krócej, niż nasłuch ech.

⁵ Echo radarowe – fala elektromagnetyczna powracająca do emitora (radaru) po jej odbiciu się od badanego obiektu, który w zależności od swoich cech odpowiednio zmienia właściwości echa.

⁶ Nasłuch ech – jedna z czynności wykonywanych przez radar, polegająca na biernym oczekiwaniu na echo powracające od obiektów meteorologicznych.

⁷ Fala elektromagnetyczna (prędkość rozchodzenia się) – rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego. Prędkość tego rozchodzenia się jest znana, stąd znając czas pomiędzy emisją promieniowania a odbiorem echa, możliwe jest wyznaczenie odległości badanego obiektu od radaru.

⁸ Azymut – kąt zawarty między północną częścią południka odniesienia a danym kierunkiem poziomym. Wartości azymutu liczone są się zgodnie z ruchem wskazówek zegara.



Ryc. 2. Orientacyjny schemat geometrii skanowania radaru meteorologicznego. Przestrzeń podlegająca skanowaniu została zaznaczona na zielono. Poszczególne elewacje zaznaczono na niebiesko. Zaznaczono przykłady dwóch podstawowych produktów – PPI (z najniższej elewacji) i CAPPI (z wysokości 8 km)⁹. Prezentowane kąty i ich wartości są jedynie wartościami poglądowymi.

Liczba kątów, pod którymi antena ustawia się i wykonuje obroty, musi być dostatecznie duża, aby zapewnić pełną informację o przestrzennym rozkładzie odbiciowości¹⁰. (ryc. 2). Zależy to od szerokości kątowej wiązki promieniowania. Wykonanie określonej liczby pełnych obrotów pod zadanymi kątami (elewacjami) pokrywającymi w całości skanowaną przestrzeń, nazywane jest **skanem objętościowym** (*ang. volume scan*). Podstawowym produktem wytwarzanym przez każdy radar meteorologiczny jest **odbiciowość**, czyli ilość echa, jaka powraca po odbiciu od hydrometeorów. Odbiciowość jest **miarą koncentracji i średnicy hydrometeorów**. Jest to bardzo uproszczona definicja, która nie uwzględnia licznych zjawisk modyfikujących tę wielkość. Mogą do nich należeć kształt hydrometeorów (owalne, spłaszczone, płaskie), ich faza (stała, ciekła bądź mieszana) oraz obecność tłumienia¹¹ i innych zakłóceń¹². Zastosowana w radarach meteorologicznych długość fal decyduje o pomijaniu najmniejszych hydrometeorów tworzących chmur, które nie przynoszą opadów. Dodatkowym produktem skanowania radaru meteorologicznego może być *przestrzenny rozkład radialnych prędkości wiatru¹³*, **pod warunkiem, że jest to radar dopplerowski**.

⁹ Więcej na stronie 7

¹⁰ Odbiciowość – miara koncentracji i średnicy hydrometeorów. Im większe są hydrometeory i im więcej znajduje się ich w danej objętości atmosfery, tym więcej promieniowania elektromagnetycznego odbija się od niej i wyższa jest odbiciowość.

¹¹ Tłumienie – zakłócenie polegające na pochłanianiu i rozpraszaniu części promieniowania emitowanego przez radar w obrębie silnych rozpraszaczy takich jak burze gradowe. W wyniku rozproszenia promieniowania obiekty znajdujące się za rozpraszaczem mają zaniżoną odbiciowość.

¹² Więcej na stronach 11-16

¹³ Więcej na stronie 6

Ze względu na krzywiznę ziemi oraz na ogół wyższego od zera kąta nachylenia anteny, wraz ze wzrostem odległości od radaru, wysokość najniższej wiązki rośnie (ryc. 2).

Pasma i rodzaje radarów

Radary meteorologiczne pracują w trzech pasmach promieniowania: **S** (2 – 4 GHz), **C** (4 – 8 GHz), **X** (8 – 12 GHz). Częstotliwości te odpowiadają łącznie zakresowi długości fal od 15 do 2,5 cm. Sieć radarów meteorologicznych (POLRAD)¹⁴ zarządzana przez IMGW działa w oparciu o radary pracujące w paśmie C. Z kolei jej amerykański odpowiednik (NEXRAD)¹⁵ działa w oparciu o radary pracujące w paśmie S. Polski system radarowy składa się z 8 radarów meteorologicznych. System amerykański ze względu na zdecydowanie większy obszar działania obejmuje aż 160 radarów. Radary pracujące w najwyższych (spośród wymienionych) częstotliwościach znajdują bardziej lokalne zastosowania, operując w mniejszym zasięgu (np. radar Ekoenergii Silesia S.A. w Goczałkowicach-Zdroju, skanujący w promieniu 100 km). Radary IMGW mogą skanować przestrzeń do 250 km wokół radaru, z kolei radary WSR 88-D pracujące w sieci NEXRAD, po modyfikacjach mogą operować aż do 460 km.

Radar Dopplerowski

Niektóre radary umożliwiają określenie prędkości niesionych wiatrem hydrometeorów (oznaczających w rzeczywistości prędkość wiatru). Odbywa się to na zasadzie efektu Dopplera, gdzie wysłana przez radar fala o określonej częstotliwości zmienia swą częstotliwość w zależności od kierunku i prędkości poruszania się badanego obiektu względem radaru. Częstotliwość echa jest mniejsza od częstotliwości impulsu emitowanego, gdy obiekt się od radaru oddala a większa, gdy obiekt się do radaru przybliża. Przedmiotowa zmiana częstotliwości jest proporcjonalna do prędkości wiatru. Możliwe jest zatem wyznaczenie stref, w których występuje określony kierunek wiatru (od lub do radaru) oraz określić jego prędkość względem radaru (prędkość radialną), którą można później przy pomocy odpowiednich algorytmów, przeliczać do prędkości rzeczywistej i rzeczywistego kierunku (0-360°).

Poprzez zastosowanie określonych algorytmów, możliwe jest wyznaczenie rozkładu prędkości wiatru wewnątrz określonej struktury chmurowej (np. burzy). Dzieje się to poprzez odjęcie od prędkości prądów powietrza wewnątrz burzy, prędkości, z którą przemieszcza się cała burza. Narzędzie to, nazywane *storm-relative motion*, służy np. do wyznaczania prędkości rotacji mezocyklonu¹⁶ w obrębie superkomórki burzowej. Polski system radarowy pracuje w całości na radarach dopplerowskich. Efekt Dopplera obserwujemy na co dzień np. podczas przejazdu karetki pogotowia. Mimo że syrena wyje ciągle z niezmiennym sygnałem, podczas zbliżania się jej do obserwatora dźwięk jest wyższy (ma większą częstotliwość), a po minięciu obserwatora, podczas oddalania się pojazdu dźwięk ma już zdecydowanie niższą wysokość (niższą częstotliwość).

¹⁴ <u>http://www.pogodynka.pl/radary</u> oraz <u>http://awiacja.imgw.pl/index.php?product=burzrad</u>

¹⁵ https://radar.weather.gov/Conus/full.php

¹⁶ Mezocyklon – rotujący prąd wstępujący. Jest on wyznacznikiem superkomórki burzowej. Rotacja mezocyklonu wzmacnia siłę tego prądu, przez co w miejscu jego występowania tworzy się obszar słabego echa a burza ma odchylony tor ruchu.

Radary z podwójną polaryzacją fali

Polskie radary wchodzące w skład sieci IMGW, w większości pracują w oparciu o urządzenia pojedynczej, poziomej polaryzacji¹⁷. Oznacza to, że pomiarem objęty jest tylko wymiar poziomy cząsteczki deszczu, mżawki, śniegu lub gradu. Radar pracujący z podwójną polaryzacją fali umożliwia również pomiar pionowego wymiaru hydrometeorów. Znając więc standardowe różnice między poziomym a pionowym wymiarem cząsteczki opadu, możliwe jest jej sklasyfikowanie jako konkretny hydrometeor. Rozpoznawanie opadów dużego gradu w Stanach Zjednoczonych obecnie odbywa się już z zastosowaniem podwójnej polaryzacji. Obecnie, w polskim systemie radarowym pracują 3 radary z podwójną polaryzacją fali (Pastewnik, Ramża i Rzeszów).

Na świecie trwają również prace nad stworzeniem nowego typu radaru z zastosowaniem antenowego szyku fazowego, który pozwoli na jeszcze szybsze wykonywanie skanów objętościowych, a tym samym przyczyni się do zwiększenia częstotliwości z jaką pozyskiwana jest informacja meteorologiczna. Od lat tego rodzaju radary stosuje się do celów wojskowych.

3. Produkty skanowania radaru

Radar wykonując skan objętościowy (skanowanie całej zadanej przestrzeni wokół radaru – zielona przestrzeń na ryc. 2) dokonuje pomiaru odbiciowości (oraz innych parametrów, w zależności od rodzaju urządzenia), które zapisywane są w formie danych przestrzennych. Na podstawie tych danych możliwe jest dalsze generowanie konkretnych produktów.

Do podstawowych produktów przetwarzania przestrzennych danych o odbiciowości pochodzących ze skanu objętościowego należą:

PPI (*Plan Position Indicator*) – rzut poziomy przedstawiający rozkład odbiciowości lub prędkości radialnych z jednej, wybranej elewacji¹⁸ (ryc. 2). Jest to produkt tworzony bardzo szybko, gdyż nie wymaga wykonania pełnego skanu objętościowego. Dużą wadą produktu jest niejednakowa wysokość położenia ech w zależności od odległości od radaru.

CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) - rzut poziomy przedstawiający rozkład odbiciowości lub prędkości radialnych na wybranej wysokości (wyrażonej w kilometrach nad powierzchnią ziemi) – ryc. 2. W odróżnieniu od produktu PPI, w przypadku CAPPI rozkład na stałej wysokości wymaga danych z więcej niż jednej elewacji. Zdarza się, że algorytm interpolujący¹⁹ wartości na stykach dwóch różnych elewacji nie działa prawidłowo i na obrazach pojawiają się kręgi wokół radaru. Efekt ten pojawia się także na innych produktach np. CMAX (ryc. 36).

¹⁷ Polaryzacja - właściwość fali poprzecznej, dotycząca uporządkowanej relacji między kierunkiem oscylacji zaburzenia, a kierunkiem rozchodzenia się fali. W odniesieniu do radarów polaryzacja może być pozioma bądź pionowa i w zależności od tego "mierzony" jest poziomy lub pionowy wymiar cząsteczek hydrometeorów.

¹⁸ Elewacja – kąt pomiędzy poziomą płaszczyzną a płaszczyzną, w której nachylona jest antena radaru. Wartość elewacji podawana jest w stopniach kątowych, analogicznie jak na ryc. 2.

¹⁹ Interpolacja – metoda określania natężenia czynnika x w punkcie, w którym wartość tego czynnika nie została zmierzona, na podstawie pomiarów w punktach sąsiednich.

CMAX (*Column Max. Reflectivity*) – maksymalna odbiciowość w kolumnie atmosfery nad danym punktem. Ten produkt identyfikuje w obrębie całego pionowego profilu troposfery najwyższą wartość odbiciowości i to ona jest zrzutowana na płaszczyznę. CMAX jest produktem udostępnianym publicznie na portalu Pogodynka.pl²⁰ oraz IMGW Awiacja²¹. Zaletą tego produktu jest możliwość szybkiej identyfikacji obszarów występowania najwyższych odbiciowości, niezależnie od wysokości, na której ona występuje. Wadą jest brak możliwości identyfikacji niektórych sygnatur odbiciowości występujących na konkretnych wysokościach (np. hook echo) oraz utrudniona możliwość rozpoznawania stref opadów i mylenia ich z hydrometeorami zawieszonymi w powietrzu i niedocierającymi do powierzchni ziemi. Sytuacja ta ma miejsce np. na frontach ciepłych i w obrębie kowadeł rozwiniętych komórek burzowych, kiedy to często zdarza się, że kropelki wody i kryształki lodu zawieszone są wysoko w troposferze nad rozległymi obszarami, podczas gdy przy ziemi opady nie występują.

VIL (*Vertically Integrated Liquid*) – wodność słupa atmosfery. Parametr wskazuje wysokość opadu, jaki jest zawieszony w słupie atmosfery²² nad danym miejscem. VIL otrzymywany jest po przeliczeniu przez algorytm wartości odbiciowości na wielkość opadu. Wyliczone wartości cechuje pewna niedokładność wynikająca z opisanych w dalszej części opracowania zakłóceń (przede wszystkim tłumienia i jednoczesnej obecności w komórce burzowej fazy ciekłej i stałej).

Echo Top – wysokość wierzchołków odbiciowości (wyrażonej w dBZ) o zadanej wartości, przedstawiana na ogół w kilometrach. Funkcja ta jest najczęściej używana do rozpoznawania wysokości wierzchołków chmur (ich maksymalnej wysokości nad powierzchnią ziemi, wyrażanej najczęściej w kilometrach) oraz wysokości, do jakich sięga odbiciowość o wartości 45 i 50 dBZ, umożliwiająca rozpoznanie zagrożenia opadem dużego gradu.

Algorytmy rozpoznające zagrożenie dużym gradem – aby zautomatyzować proces identyfikacji obszarów zagrożonych gradobiciem w czasie rzeczywistym, stworzono algorytmy, które w sposób automatyczny, na podstawie charakterystyk odbiciowości i niektórych innych właściwości atmosfery, określają rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia gradu w rejonie działania radaru. Najbardziej popularnym algorytmem jest *Hail Detection Algorithm* (HDA; Witt 1998), który stanowi w praktyce rozwinięcie algorytmu Waldvogela (1979). HDA bazuje na różnicy pomiędzy wierzchołkiem echa o wartości 45 dBZ²³ a wysokością izotermy zero²⁴. Jeśli różnica ta wynosi więcej niż 1,6 km, opady gradu są możliwe. Prawdopodobieństwo tych opadów w miarę wzrostu tej różnicy rośnie, aż do różnicy wynoszącej 5,5 km, kiedy to prawdopodobieństwo opadów gradu osiąga 100%. W Polsce znane są przypadki, gdzie różnica ta przekraczała nawet 10 km! Algorytm HDA stosowany jest przez

²⁰ http://www.pogodynka.pl/radary

²¹ http://awiacja.imgw.pl/index.php?product=burzrad

²² Słup atmosfery – teoretycznie wyznaczona przestrzeń w atmosferze obejmująca sześcian o określonej podstawie (np. 1 km x 1 km) i o określonej wysokości (np. 20 km). Jeśli w wyznaczonym słupie atmosfery wodność wynosi 20 mm, wtedy zebrana z całego tego słupa woda utworzyłaby na jego podstawie warstwę o grubości 20 mm.

²³ dBZ - rodzaj miary przedstawiającej moc promieniowania odbitego od hydrometeorów znajdujących się w atmosferze (inaczej odbiciowość hydrometeorów). Jednostką odbiciowości jest Z, ale z powodów praktycznych jej wartości przyjęto przedstawiać w skali logarytmicznej w postaci decybeli-Z (dBZ).

²⁴ Izoterma zero – wysokość w troposferze, na której temperatura osiąga wartość 0°C.

IMGW w udostępnianym publicznie na portalu Pogodynka.pl produkcie *ZHAIL*²⁵ określającym prawdopodobieństwo wystąpienia gradu.

Jeszcze prostszą techniką rozpoznawania zagrożenia opadami gradu jest technika Lemona (1980). Jeśli na wysokości 8 km nad ziemią odbiciowość wynosi co najmniej 50 dBZ, wtedy wystąpienie gradu jest możliwe. Metoda ta jest bardzo prosta i odznacza się dużą skutecznością, jednak biorąc pod uwagę zmienne warunki synoptyczne występowania opadów gradu, metoda ta może potencjalnie generować sporo fałszywych alarmów. Ponadto w celu identyfikacji zagrożenia niezbędny jest dostęp do obrazów CAPPI (8 km).

Przekroje pionowe – oprogramowanie umożliwia również generowanie przekrojów pionowych wzdłuż prostej lub wzdłuż łamanej. Najłatwiej generować przekroje na podkładzie produktu PPI lub CAPPI z dolnej troposfery, gdyż na niewielkich wysokościach często widoczne są cechy echa radarowego, w oparciu o które prowadzi się przekrój.

4. Interpretacja obrazów radarowych

Analizę odbiciowości należy rozumieć przestrzennie. Utożsamianie danych radarowych wyłącznie z opadem, wyłącznie w pobliżu powierzchni ziemi jest błędem, gdyż radar wykrywa także hydrometeory zawieszone wysoko w atmosferze, niedocierające do powierzchni ziemi. Należy jednak zaznaczyć, że najczęściej hydrometeory (kropelki deszczu, płatki śniegu, gradziny), które osiągają średnicę wystarczająco dużą, by zostały zobrazowane przy pomocy radaru meteorologicznego, występują najczęściej na niskich wysokościach i w zdecydowanej większości przypadków stanowią opad. Ma to szczególnie duże znaczenie, gdy rozpoznajemy strefy opadu w oparciu o ogólnodostępny produkt CMAX. W jego przypadku często zdarza się, że strefy opadu są mniejsze, niż wynikałoby to z rozkładu odbiciowości prezentowanego na produkcie.

Rodzaj opadów

Pierwszą cechą, jaką można rozpoznać przy pomocy ogólnodostępnych obrazów radarowych, jest wielkość i kształt strefy odbiciowości. Zasadniczy podział za względu na tę cechę to podział na opady wielkoskalowe oraz opady burzowe. Opady wielkoskalowe cechuje duży obszar ich występowania oraz niskie i umiarkowane natężenie (ryc. 4). Z kolei opady burzowe cechuje komórkowy (lokalny) charakter oraz wysokie natężenie (ryc. 3).

Natężenie opadu

Na ogół przyjmuje się, że natężenie opadu rośnie wraz ze wzrostem wartości odbiciowości. Jest to postęp zbliżony do geometrycznego. Przykładowo przy odbiciowości wynoszącej 10 dBZ natężenie opadu powinno wynosić 0,2 mm/h, przy wartości 25 dBZ 1,5 mm/h, przy 40 dBZ 10 mm/h a przy 55 dBZ 100 mm/h²⁶.

Istnieje jednak wiele różnych czynników, które sprawiają, że zależność ta w wielu sytuacjach nie jest zachowana. Szczegółowo opisano to w sekcji "zakłócenia".

²⁵ http://www.pogodynka.pl/zhail

²⁶ http://awiacja.imgw.pl/index.php?product=burzrad



Ryc. 3. Przykład występowania nad Polską licznych komórek burzowych na obrazie CMAX. Komórki burzowe stanowią niewielkie "plamy" o wysokiej odbiciowości. Źródło: IMGW – PIB



Ryc. 4. Przykład występowania nad południową Polską opadów o charakterze wielkoskalowym widocznych na produkcie CMAX. Źródło: IMGW – PIB

Zakłócenia i ograniczenia

Poprzez zakłócenia należy rozumieć wszystkie niepożądane echa, cechy jego ułożenia oraz zaniżone lub zawyżone wartości odbiciowości, niebędące wynikiem naturalnego rozkładu hydrometeorów w przestrzeni.

Stosunkowo często pojawiającym się zakłóceniem są echa występujące w postaci linii prostych wychodzących od miejsca lokalizacji radaru, rozszerzające się w miarę wzrostu odległości od radaru (ryc. 5). Linie te powstają ze względu na pracę niektórych nadajników Wi-Fi na tej samej częstotliwości, na której pracują radary meteorologiczne. Jest to całkowicie fałszywe echo, którego obecność można zignorować.



Ryc. 5. Produkt CMAX systemu POLRAD, 12 września 2014 r. Przykład zakłóceń wywołanych obecnością nadajników pracujących na tych samych częstotliwościach, na których pracują radary meteorologiczne (linie proste). Źródło: IMGW – PIB.

Dość częstym zakłóceniem jest również tłumienie odbiciowości. Jeśli pomiędzy badanym przez nas obiektem meteorologicznym a radarem znajduje się obiekt o silnej odbiciowości (np. burza), wtedy stosunkowo duża część promieniowania zostaje przez taki obiekt pochłonięta, dlatego też mniej promieniowania dociera do badanego obiektu i mniej promieniowania się od niego odbija (ryc. 6). Stąd właśnie niższa odbiciowość obiektów znajdujących się za obiektami o silnej odbiciowości. Jeśli za komórką burzową o silnym echu (patrząc z perspektywy radaru) znajduje się inna komórka burzowa, należy spodziewać się, że jej odbiciowość jest zaniżona. W przypadku radarów o podwójnej polaryzacji fali możliwa jest eliminacja efektu tłumienia, dzięki zastosowaniu odpowiedniego współczynnika zależnego wyłącznie od różnic w propagacji, a nie od jej mocy fali.



Ryc. 6. Obraz CAPPI (8 km) z 20 lipca 2007 r. z obecnym silnym tłumieniem ech zlokalizowanych za burzą znajdującą się bliżej radaru. Radar Brzuchania. Źródło: IMGW – PIB.

Z geometrii i strategii skanowania wynika obecność tzw. martwych pól, których radar nie skanuje (ryc. 7). Pierwsze z nich zlokalizowane jest w strefie przyziemnej. Najniższa wiązka promieniowania radaru kierowana jest w przestrzeń zwykle pod kątem 0,5°, stąd w miarę oddalania się od radaru, wiązka ta będzie przebiegała wyżej, a przestrzeń pod nią nie będzie skanowana. Efekt ten jest dodatkowo powodowany przez krzywiznę ziemi. Przykładowo – jeśli radar jest umiejscowiony w Legionowie na wysokości ok. 110 m n.p.m. i na takiej wysokości przebiega najniższa wiązka promieniowania w pobliżu radaru, to w odległości 250 km od radaru (maksymalny zasięg tego radaru), w rejonie Suwałk, najniższa wiązka przebiegać będzie już na wysokości ok. 6 km. Zatem w rejonie Suwałk wszystkie obiekty meteorologiczne znajdujące się niżej niż 6 km będą dla radaru niewidoczne. Nie będzie więc możliwa detekcja wielu sygnatur oraz opadów z chmur niskich, zwłaszcza w półroczu chłodnym. Na wspomniany efekt nakłada się jeszcze ukształtowanie powierzchni. Jeśli na drodze wiązki promieniowania na najniższej elewacji stanie łańcuch górski, wszystkie obiekty znajdujące się za nim będą dla radaru zupełnie niewidoczne.



Ryc. 7. Martwe pola w obrębie przestrzeni skanowanej przez radar (czerwone strefy) oraz przestrzeń objęta skanowaniem (zielone strefy). Uwaga! Prezentowane kąty i ich wartości są jedynie wartościami poglądowymi.

Drugim obszarem, który nie podlega skanowaniu, jest obszar w kształcie stożka znajdujący się bezpośrednio nad radarem. Jego obecność uwarunkowana jest określoną strategią skanowania (która determinuje maksymalny kąt, pod którym radar skanuje) oraz oszczędnością czasu potrzebnego na skanowanie stosunkowo małej przestrzeni bezpośrednio nad radarem – ryc. 7.

Zdarzają się również zakłócenia wynikające z obecności w atmosferze ech antropogenicznych. Istnieją specjalne substancje, które rozpylone w atmosferze widziane są przez radary jako chmura o wysokiej odbiciowości. Rozpylanie to ma na celu utrudnienie lub uniemożliwienie rozpoznania obiektów wojskowych (np. samoloty zmierzające na terytorium wroga). Wypuszczenie substancji sztucznie generujących echo stanowi rodzaj zasłony dymnej dla radaru. Zdarzenia związane z emisją tych substancji są bardzo rzadkie. Mogą być mylone z obecnością chmur burzowych, szczególnie w krótkim czasie od emisji. Od prawdziwych ech odróżnia je kształt tuż po rozpyleniu nawiązujący do trasy przelotu samolotu rozpylającego – może mieć kształt linii prostej, okręgu lub ósemki (ryc. 8).

Bywa również, że odbiciowość jest istotnie zawyżana przez czynniki naturalne. Przykładem takich zakłóceń są opady śniegu występujące przy dodatniej temperaturze powietrza, gdy płatki śniegu przechodząc przez warstwę powietrza o dodatniej temperaturze, pokrywają się cienką warstewką wody. W takiej sytuacji występujący opad jest zdecydowanie mniej intensywny, niż sugerowałaby to odbiciowość (ryc. 9). Pokrycie powierzchni opadu stałego (śniegu, krupy lub gradu) warstewką wody powoduje istotne zwiększenie ilości echa odbijanego od tego rodzaju opadu. Nawet jeśli temperatura przy ziemi jest dodatnia i pada deszcz, omawiany efekt może się pojawiać ze względu na formowanie się opadów śniegu w chłodnych warstwach troposfery i jego topnienie w

miarę opadania w cieplejszym powietrzu. W efekcie na powierzchni ziemi opad pojawia się już w postaci ciekłej.



Ryc. 8. Obraz CMAX z 15 września 2016 r. Widoczna odbiciowość została sztucznie wygenerowana poprzez emisję przez lotnictwo wojskowe specjalnej substancji silnie odbijającej promieniowanie radarowe. Kształt echa nawiązuje do trasy przelotu samolotu. Źródło: IMGW – PIB.



Ryc. 9. Przykład silnej odbiciowości w miejscach występowania opadów mieszanych przy dodatniej temperaturze na produkcie CMAX. Odbiciowość w miejscu opadu jest silnie zawyżona a natężenie opadu jest zdecydowanie niższe niż wynikałoby to z odbiciowości. Źródło: IMGW – PIB.

Rozchodzenie się wiązki promieniowania emitowanej przez radar nie jest jednakowe. Zależy ono od warunków w jakich wiązka jest emitowana. Przede wszystkim, duży wpływ na wysokość na której ostatecznie znajdzie się wiązka na końcu zasięgu radaru, ma refrakcja. Zjawisko to polega w tym przypadku na "odginaniu się" wiązki promieniowania od kształtu prostej w kierunku powierzchni ziemi (ryc. 10). W algorytmach przetwarzających dane radarowe przyjęto pewne standardowe wartości refrakcji, jednak w rzeczywistości wartości te mogą odbiegać od przyjętych założeń. W wyniku oddziaływania refrakcji wysokość na której widoczny jest na produktach obiekt meteorologiczny ulega zawyżeniu.



Ryc. 10. Istota zjawiska refrakcji. Schemat poglądowy.

Ważniejsze sygnatury radarowe w obrębie groźnych burz oraz ich cechy

Przykłady wybranych sygnatur odbiciowości radarowej z terenu Polski opisano w artykule naukowym, w czasopiśmie Teledetekcja Środowiska nr 51.

http://geoinformatics.uw.edu.pl/wp-content/uploads/sites/26/2015/07/TS_v51_93_Pilorz.pdf

Przestrzenny rozkład odbiciowości w obrębie danej burzy, pozwala na ocenę burzy (układu burzowego) pod kątem występowania groźnych zjawisk w jej obrębie. Ocenę tą przeprowadza się na podstawie ułożenia obszarów o niskiej i wysokiej odbiciowości, które są efektem rozmieszczenia w obrębie burzy prądów wstępujących²⁷ i zstępujących²⁸ (oraz ich siły), co wskazuje na występowanie potencjalnie groźnych zjawisk towarzyszących burzy (układowi burzowemu).

Charakterystyczne ułożenia stref odbiciowości, które sygnalizują występowanie zagrożenia, nazywane są **sygnaturami**. Na ich podstawie możliwe jest wydawanie ostrzeżeń przed groźnymi zjawiskami. Przy pomocy radaru możliwe jest stwierdzenie potencjalnego zagrożenia ze strony opadów dużego gradu, nawalnych opadów deszczu, silnych porywów wiatru (jednak nie zawsze!) oraz trąb powietrznych. Ostrzeżeń nie można jednak bezpośrednio utożsamiać ze stuprocentową

²⁷ Prąd wstępujący – niewielka kolumna powietrza wznoszącego się w kierunku wnętrza chmury burzowej
²⁸ Prąd zstępujący niewielka kolumna powietrza opadającego w kierunku powierzchni ziemi; tu: w obrębie komórki burzowej

informacją, że dane zjawisko na pewno wystąpi. Za każdym razem jest to kwestia indywidualna. W przypadku opadów gradu o średnicy co najmniej 5 cm, średni czas pomiędzy pierwszym pojawieniem się sygnatury sygnalizującej zagrożenie, a wystąpieniem tego opadu wynosi 29 minut.

Do najważniejszych sygnatur odbiciowości należą:

Obszary słabego echa

(*ang. Weak-Echo Regions – WER / Bounded Weak-Echo Regions-BWER*). Istnieją dwie formy tej sygnatury. Pierwsza z nich to obszar słabego echa, który nie został ograniczony przez nawis silnej odbiciowości z obu stron. Druga forma to obszar słabego echa ograniczony z obydwu stron strefami i nawisami silnej odbiciowości. Jest to najistotniejsza sygnatura odbiciowości w obrębie groźnych burz świadcząca o możliwości wystąpienia licznych zagrożeń.



Ryc. 11. Przykład sygnatury ograniczonego obszaru słabego echa (BWER) na przekroju pionowym obrazu odbiciowości superkomórki z 5-cm gradem między Staszowem a Opatowem 5 sierpnia 2012 r. Źródło: IMGW – PIB

Obszary słabego echa sygnalizują występowanie silnego prądu wstępującego (np. mezocyklonu). Praktycznie zawsze, gdy prąd wstępujący jest na tyle silny, aby utworzyć WER, burza go zawierająca niesie ze sobą jakieś zagrożenie. Począwszy od nawalnych opadów deszczu, poprzez opady dużego gradu a na trąbach powietrznych skończywszy. W praktyce, obszary słabego echa obserwowane są najczęściej w obrębie superkomórek burzowych (gdzie sygnalizują występowanie

mezocyklonu) oraz w obrębie rozległych linii szkwałowych (gdzie oznaczają miejsce występowania rozległego prądu wstępującego przed czołem linii szkwału).

Niższe odbiciowości w obrębie obszarów słabej odbiciowości, jak piszą Knight i Knight (2001), są spowodowane dużą prędkością prądów wstępujących, w których obrębie duże hydrometeory nie są w stanie się koncentrować i są szybko usuwane ze względu na znaczną prędkość wspomnianego prądu. W strefach silnych prądów wstępujących utrudniony jest również wzrost gradzin. Czynniki te wpływają na niską odbiciowość w miejscach występowania silnych prądów wstępujących.

W przypadku superkomórki burzowej rozkład odbiciowości powinien nawiązywać do wyidealizowanego schematu (ryc. 12), stworzonego w oparciu o radarowe obrazowania wielu superkomórek w różnych miejscach na świecie.



Ryc. 12. (a) Radarowy obraz superkomórki burzowej na wysokości 1, 4, 7, 10 i 13 km i (b) pionowe przekroje wzdłuż odcinka AB (górny rysunek) i odcinka CD (dolny rysunek). Odbiciowości podane w dBZ. Źródło: Chisholm i Renick 1972.



Ryc. 13. Przykład sygnatury ograniczonego obszaru słabego echa (BWER) na przekroju pionowym obrazu odbiciowości superkomórki burzowej w rejonie Mikołowa 3 lipca 2012 r. Źródło: IMGW – PIB.



Ryc. 14. Pionowy rozkład odbiciowości w obrębie prawoskrętnej superkomórki burzowej, która przechodziła 6 maja 2015 r. w rejonie Popradu na Słowacji. Źródło: Singer (2015); shmu.sk

Najlepszą metodą detekcji obszarów słabego echa jest wykonanie przekroju w odpowiednim miejscu burzy. W przypadku superkomórki burzowej będzie to tylna część burzy, a w przypadku linii szkwału – jej przednia część. Możliwa jest również analiza produktu CAPPI z kilku różnych wysokości (tak jak na ryc. 16, 17 i 19), gdzie na skanach z dolnej i środkowej troposfery obecny jest obszar słabego echa, nad którym bezpośrednio zlokalizowany jest obszar o silnej odbiciowości oraz najwyższa część burzy.



Ryc. 15. Przekrój pionowy przez tylną część superkomórki gradowej, która godzinę po wykonaniu tego przekroju przyniosła opady gradu o średnicy do 6,5 cm w Tychach. 10 czerwca 2013 r. Radar Ramża. Źródło: IMGW – PIB.

Analizowana w ten sposób pionowa struktura burzy pozwoli na stwierdzenie obszarów słabego echa w dolnej części burzy (w przypadku superkomórek także hook echa), a także obszarów o wysokiej odbiciowości dokładnie nad obszarami słabego echa oraz w bezpośrednim ich sąsiedztwie – dokładnie tak, jak ma to miejsce na ryc. 16 – 19. Analiza pionowej struktury burzy jest niezbędna do poprawnej oceny wszystkich sygnatur odbiciowości radarowej, a tym samym do stwierdzenia czy dana burza jest groźna, czy nie.

Na ryc. 16 przedstawiono pionową strukturę odbiciowości znanego przypadku superkomórki. Burza ta spowodowała serię trąb powietrznych 15 sierpnia 2008 r. Na wysokości 1 km znajduje się bardzo dobrze rozwinięte hook echo. Cały obszar leżący na zachód od niego to WER – miejsce, w którym następuje silny napływ powietrza spoza burzy do mezocyklonu. Napływ ten jest doskonale zaznaczony na wysokości 4 km. Tam obszar WER został już skręcony przez mezocyklon. Na wysokości 7 km widoczny jest już tylko BWER oznaczający lokalizację mezocyklonu. Z kolei na 10 i 13 km najwyższe odbiciowości zarejestrowane zostały dokładnie tam, gdzie na niższych poziomach widoczne były obszary słabego echa i gdzie występował mezocyklon. Przekrój przez wspomnianą superkomórkę prezentuje ryc. 18. Ryc. 21 również prezentuje przekrój przez "tornadyczną" superkomórkę z dobrze zaznaczonym obszarem słabego echa, które jednak w przeciwieństwie do burzy z 15 sierpnia 2008 roku, osiągało umiarkowane wartości.



Ryc. 16. Pionowa struktura odbiciowości w obrębie prawoskrętnej, cyklicznej superkomórki burzowej, która spowodowała wystąpienie co najmniej 3 trąb powietrznych 15 sierpnia 2008 r. Prezentowana struktura występowała ok. pół godziny przed pojawieniem się pierwszej trąby. Źródło: IMGW – PIB.



Ryc. 17. Obrazy PPI z kilku różnych elewacji uszeregowane rosnąco, zgodnie z kierunkiem tekstu. Typowa pionowa struktura superkomórki burzowej. Na pierwszym obrazie widoczna jest sygnatura WER, a na drugim – BWER, ponad którym zlokalizowany jest wierzchołek burzy. Źródło: crh.noaa.gov



Ryc. 18. Przekrój pionowy przez prawoskrętną superkomórkę burzową z dobrze zaznaczonym silnym obszarem słabego echa. Źródło: IMGW – PIB



Ryc. 19. Przestrzenny rozkład odbiciowości w obrębie superkomórki burzowej w rejonie Levoczy na Słowacji 6 maja 2015 r. Na obrazie CAPPI z 2, 4, 6 i 8 km nad ziemią bardzo dobrze uwidoczniony został obszar słabego echa w miejscu występowania mezocyklonu i obszar wysokiej odbiciowości bezpośrednio nad nim. Źródło: Singer (2015), shmu.sk



 Time sampling: 45

 PRF:
 1200 Hz / 900 H

 Height:
 0.000 km to

 16.000 km
 16.000 km

 Disp Len:
 29 km

 Hor Res:
 0.073 km/pixel

 Vert Res:
 0.053 km/pixel

 Data:
 Radar Data

 Rainbow@ SELEX-SI

Ryc. 20. Pionowa struktura odbiciowości w obrębie superkomórki burzowej, która przyniosła opad gradu o średnicy do 5 cm w rejonie Tarnowa. Grafika po lewej stronie przedstawia produkt PPI z najniższej elewacji z sygnaturą hook echo i WER, natomiast grafika po prawej, stanowi przekrój przez miejsce występowania prądu wstępującego (w tym przypadku mezocyklonu), którego lokalizację zaznaczono na produkcie PPI czarną linią. Źródło: IMGW – PIB.



Ryc. 21. Przestrzenny rozkład odbiciowości z obszarem słabego echa w obrębie tornadycznej superkomórki 20 lipca 2007 r. w pow. częstochowskim. Przekrój poprowadzono przez środek sygnatury hook echo. PPI (0,5°), radar Brzuchania.

Wpływ silnego prądu wstępującego na "groźność" burz

Silny prąd wstępujący, który sygnalizowany jest przez omawianą sygnaturę, przede wszystkim powoduje wzmożony transport dużych ilości wody do środkowej i górnej troposfery, gdzie para wodna ulega kondensacji²⁹, mniejsze kropelki wody łączą się w większe, a następnie opadają na ziemię w postaci deszczu. W uproszczeniu można zatem powiedzieć, że im silniejszy jest prąd wstępujący, tym silniejszy będzie potencjalny opad deszczu. Potwierdziły to m.in. badania Doswella (1994, 1999), które dowiodły, że superkomórki odpowiadają również za wiele incydentów z nawalnymi opadami deszczu.

Transport dużych ilości wilgoci powoduje nagromadzenie się znacznych ilości przechłodzonej wody w środkowej troposferze, o temperaturze ok. minus kilkunastu stopni Celsjusza. Ze względu na występowanie silnego prądu wstępującego i utrzymywanie się przez relatywnie długi czas gradzin w takich warunkach, możliwy jest ich wzrost do ogromnych rozmiarów, które spadając na ziemię, powodują wiele szkód. Aby jednak duży grad dotarł do powierzchni ziemi, muszą zaistnieć odpowiednie warunki synoptyczne. Występowanie gradu wiąże się z bardzo wysokimi wartościami energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie³⁰, umiarkowane i wysokie wartości ścinania wiatru³¹ (proporcjonalnie wyższe w warstwie 0-6 km niż w warstwie 0-1 km) oraz stosunkowo niska zawartość pary wodnej w dolnej troposferze, która podnosi poziom kondensacji. Spośród wszystkich groźnych zjawisk, opady dużego gradu występują w warunkach o najwyższym poziomie kondensacji oraz w czasie występowania jednych z najniższych wartości uskoku wiatru w warstwie 0-1 km.

Najgroźniejszą formą zorganizowanej konwekcji jest **superkomórka burzowa**. Mezocyklon będący jej nieodłącznym elementem powoduje powstanie obszaru słabego echa i dlatego ten rodzaj burzy jest stosunkowo łatwo rozpoznawalny. Ze względu na kierunek przemieszczania się wyróżnia się dwa rodzaje superkomórek burzowych – prawoskrętne – right-moving (RM) i lewoskrętne – left-moving (LM). Jak sama nazwa wskazuje – superkomórki prawoskrętne poruszają się bardziej w prawo a lewoskrętne – bardziej w lewo w stosunku do torów ruchu pozostałych burz. Odchylony tor ruchu spowodowany jest obecnością mezocyklonu (w superkomórkach prawoskrętnych) i mezo-antycyklonu³² (w superkomórkach lewoskrętnych).

Najgroźniejszym, a jednocześnie najrzadziej występującym zjawiskiem towarzyszącym burzom są trąby powietrzne. Przy pomocy sygnatur odbiciowości możliwe jest wykrywanie wyłącznie zagrożenia trąbami mezocyklonalnymi (związanymi z obecnością superkomórki burzowej). Niemożliwe jest natomiast określenie prawdopodobieństwa wystąpienia trąb typu land-³³ i waterspout³⁴.

³⁰ Energia potencjalnie dostępna konwekcyjnie - miara wartości energii dostępnej dla procesu konwekcji

²⁹ Kondensacja – proces przechodzenia gazu w ciecz

³¹ Uskok wiatru - różnica w prędkości (uskok prędkościowy) i kierunku (uskok kierunkowy) wiatru w małej odległości

³² Antycyklon – zamknięty układ izobar, w którym ciśnienie wzrasta ku środkowi układu, a wiatr w swobodnej atmosferze na półkuli północnej wieje wzdłuż izobar w prawo.

 ³³ Trąba lądowa (ang. landspout) - trąba powietrzna występująca nad powierzchnią ziemi, która nie jest związana z działalnością mezocyklonu. Pojawia się pod chmurą Cumulonimbus, bądź Cumulus congestus.

³⁴ Trąba wodna (ang. waterspout) - odpowiednik trąby lądowej występującej nad powierzchnią wody.



Ryc. 22. Obraz PPI (0,5°) superkomórki burzowej z hook echo i obszarem słabego echa. Źródło: weather.gov

Aby z danej burzy "zeszła" trąba powietrzna, poza występowaniem określonych sygnatur, musi zostać spełniony szereg ściśle określonych warunków synoptycznych. Dlatego też trąby powietrzne występują bardzo rzadko. Znając jednak przybliżone warunki, jakie panują w danym momencie w troposferze, można na podstawie obecności w obrębie danej burzy obszaru słabego echa oraz silnej rotacji na obrazie prędkości radialnych blisko powierzchni ziemi wnioskować, że cechuje się ona wyższym prawdopodobieństwem wystąpienia trąby powietrznej. Należy jednak zaznaczyć, że stacjonarny radar meteorologiczny o niskiej rozdzielczości nie jest w stanie bezpośrednio wykryć obecności trąby powietrznej, wobec rozdzielczości pojedynczego piksela 500 x 500 lub 1000 x 1000 metrów. W przypadku najsilniejszych tornad duża liczba szczątków porwana przez trąbę pojawia się również na obrazie odbiciowości w postaci sygnatury "debris ball" opisanej poniżej. W przypadku trąb powietrznych decydującym czynnikiem jest duże przyspieszenie prądu wstępującego w dolnej troposferze, a nie jego ogólna siła.

Hook Echo – Hakowate echo

"Hook Echo jest bezpośrednim rezultatem cyrkulacji mezocyklonalnej w superkomórce burzowej" (Markowski 2002). Jest to bodaj najbardziej znana szerokiemu gronu odbiorców sygnatura odbiciowości radarowej. Sygnatura hook echo występuje na niewielkiej wysokości nad ziemią, toteż należy jej poszukiwać na produkcie PPI z najniższej elewacji (np. ryc. 22) lub na produkcie CAPPI z niewielkiej wysokości. Sygnatura uwidacznia się, gdy obecny w superkomórce burzowej mezocyklon (rotujący prąd wstępujący) powoduje powstanie obszaru słabego echa, wokół którego zawinięta zostaje przezeń strefa opadu widoczna właśnie w postaci hook echa. Obszar słabego echa widoczny w sąsiedztwie hook echa oraz silny poziomy gradient odbiciowości świadczą o występowaniu w dolnej części burzy silnego napływu powietrza do burzy, zasysanego przez mezocyklon. Obszar ten stanowi dolną część sygnatury obszaru słabego echa opisanej powyżej. Cecha ta jest również cechą wskaźnikową, świadczącą o zagrożeniu, jakie niesie ze sobą dana burza. Jeśli superkomórka burzowa zawiera mezo-antycyklon, wtedy kierunek wygięcia się sygnatury hook echo będzie przeciwny w stosunku do superkomórki zawierającej mezocyklon. Przykład silnej, lewoskrętnej superkomórki zawierającej mezo-antycyklon przedstawiono na ryc. 26.

Fujita (1973) wyróżnił 5 fizjonomicznych form sygnatury hook echo (ryc. 23). Szacuje się, że około połowa superkomórek obserwowanych na obrazach polskiego systemu radarów meteorologicznych wytwarza sygnaturę hook echo.



Ryc. 23. Odmiany sygnatury hook echo, jakie wyróżnił Fujita (1973). Wszystkie odmiany – oprócz spiral - były obserwowane w Polsce. Źródło: Fujita 1973.



Ryc. 24. Superkomórka burzowa. Obraz PPI z najniższej elewacji z bardzo dobrze wykształconą sygnaturą hook echo otoczoną przez obszar słabego echa zaznaczający miejsce występowania mezocyklonu. Źródło: NWS NOAA.



Ryc. 25. Superkomórka burzowa z sygnaturą hook echo oraz obszarem słabego echa w momencie przekraczania przez trąbę powietrzną autostrady A4. 15 sierpnia 2008 r., produkt PPI z najniższej elewacji, radar Ramża. Źródło: IMGW – PIB.



Ryc. 26. Lewoskrętna superkomórka burzowa z hook echo, która przyniosła opady gradu do 6,5 cm średnicy w rejonie Czechowic–Dziedzic 3 lipca 2012 r. Produkt PPI z najniższej elewacji, radar Ramża. Źródło: IMGW – PIB.

Sygnatura hook echo na niskiej wysokości występuje zwykle jako odmiana *pendant, hook* lub *bird* (wg Klasyfikacji Fujity 1978). Na wyższych poziomach często klasyczny hak "domyka się", co jest widoczne na obrazach odbiciowości w postaci sygnatury hook echo odmiany *doughnut*. Ta odmiana sygnatury hook echo wystąpiła w obrębie "tornadycznej" superkomórki 20 lipca 2007 r. w pow. częstochowskim (ryc. 27).



Ryc. 27. Superkomórka burzowa z sygnaturą hook echo (doughnut shape) w momencie występowania trąby powietrznej w gminie Kłomnice. Produkt PPI (0,5°), radar Brzuchania. Źródło: IMGW – PIB.

Odchylona trajektoria burzy

Ze względu na obecność rotującego prądu wstępującego, burze superkomórkowe poruszają się inaczej niż pozostałe komórki burzowe i inne struktury opadowe. Superkomórki prawoskrętne poruszają się ok. 20° w prawo (ryc. 28) i z 85% średnią prędkością wiatru dla średnich prędkości wiatru większych niż 15 m/s, w przeciwnym razie ruch odbywa się około 30° w prawo, z 75% średnią prędkością wiatru (Davies i Johns 1993).

Odchylona trajektoria jest najprostszym sposobem rozpoznawania superkomórek burzowych. Co ważne, możliwe jest rozpoznanie w ten sposób superkomórek, bazując tylko na udostępnianym publicznie przez IMGW, w czasie rzeczywistym produkcie CMAX.

Spójność "rdzenia" i czas trwania burz superkomórkowych

Poza odchylonym torem ruchu burz superkomórkowych, na ogólnodostępnych obrazach CMAX możliwe jest rozpoznanie superkomórki także poprzez obecność przeważnie silnego i spójnego

rdzenia silnej odbiciowości. Zazwyczaj superkomórki są burzami trwalszymi niż zwykłe komórki burzowe, jednak czasami zdarza się, że superkomórka trwa mniej niż godzinę.

Jeśli na obrazie CMAX widoczna jest burza, która: a) porusza się wolniej, b) porusza się torem odchylonym lekko w prawo bądź lekko w lewo, c) ma spójny, silny rdzeń, d) trwa stosunkowo długo - jest niemal pewne, że jest to superkomórka burzowa. Możliwe jest zatem łatwe rozpoznanie tego groźnego rodzaju burzy na podstawie ogólnodostępnych danych radarowych.

Na ryc. 26 przedstawiono 4 obrazy CMAX wykonywane w odstępach 15-minutowych. Widoczne są na nich 2 burze superkomórkowe. Prawidłowe rozpoznanie rodzaju burz było możliwe dzięki takim cechom jak odchylony kierunek przemieszczania się komórek burzowych oraz spójna strefa wysokiej odbiciowości trwająca przez cały okres ich istnienia. Po lewej stronie widoczna jest superkomórka prawoskrętna (RM) przemieszczająca się z zachodu na wschód, a u dołu znajduje się superkomórka lewoskrętna (LM) przemieszczająca się z południa na północ. Odchylenie kierunku poruszania się obu komórek w kierunku siebie sprawiło, że możliwe było przecięcie się trasy superkomórki prawoskrętnej przez lewoskrętną.



Ryc. 28. Obraz dwóch superkomórek (prawoskrętnej i lewoskrętnej) na produkcie CMAX radaru słowackiego 7 kwietnia 2016 r. Superkomórka prawoskrętna przyniosła opad gradu do 5 cm średnicy. Źródło: imeteo.sk

Na ryc. 29. zaprezentowano obrazy tej samej, prawoskrętnej, "tornadycznej" superkomórki burzowej na produkcie CMAX i PPI z najniższej elewacji. Jak widać na tym porównaniu, obszar odbiciowości na produkcie CMAX jest zdecydowanie większy niż na produkcie PPI. Wynika to z faktu zawieszenia części hydrometeorów w środkowej i górnej troposferze i utrzymywaniu ich na tej wysokości przez silny prąd wstępujący (w tym przypadku mezocyklon). Najistotniejszy jest jednak brak możliwości rozpoznania sygnatury hook echo oraz obszarów słabego echa występujących na niewielkich wysokościach na produkcie CMAX.



Ryc. 29. Porównanie wyglądu prawoskrętnej superkomórki burzowej z 15 sierpnia 2008 r. na obrazie CMAX (lewa grafika) oraz na obrazie PPI z najniższej elewacji (prawa grafika). Źródło: IMGW – PIB.

Bow Echo – Łuk szkwałowy

Sygnatura odbiciowości radarowej widoczna na niewielkiej wysokości na produktach PPI lub CAPPI; zwykle również na produkcie CMAX, sygnalizująca możliwość wystąpienia niszczących porywów wiatru. Bow echo tworzy się najczęściej w obrębie rozległych linii szkwałowych³⁵ i stanowi jej fragment. Czasami zdarza się również, że sygnatura ta tworzy się w wyniku transformacji superkomórki, gdzie dominującą rolę przejmuje przedni prąd zstępujący - FFD (*ang. Forward Flank Downdraft*) – ryc. 31. <u>Występowanie sygnatury bow echo nie zawsze świadczy o występowaniu niszczących porywów wiatru.</u> Ich wystąpienie w obrębie sygnatury bow echo uprawdopodobniają sprzyjające warunki synoptyczne (obecność w dolnej troposferze silnego uskoku wiatru i niedosytów wilgoci). Bow echo może mieć od kilku do kilkuset kilometrów szerokości; może być częścią bardzo rozległej sygnatury LEWP, którą szczegółowo opisano poniżej. W tylnej części sygnatury bow echo często pojawia się obszar o obniżonej odbiciowości (RIN), którego cechy zostały opisane poniżej. Najsilniejszych porywów wiatru należy spodziewać się w środkowej części bow echo, za którą pojawia się RIN.

Bow echo powstaje w wyniku oddziaływania silnego prądu zstępującego, który jako zimny – cięższy od powietrza zalegającego przed układem burzowym wypycha dynamicznie duże ilości

³⁵ Więcej na stronach 33-34

cieplejszego i wilgotnego powietrza znajdującego się przed burzą, co powoduje powstanie dużej ilości hydrometeorów widocznych w postaci łuku. Łukowaty kształt sygnatura zawdzięcza silnym prądom zstępującym, które koncentrują się w centralnej części linii szkwału, która dzięki temu zostaje wygięta w kształt łuku.



Ryc. 30. Wyidealizowany model bow echo z towarzyszącymi mu cechami – RIN (weak echo channels), nawisem odbiciowości (overhang), silnym poziomym gradientem odbiciowości na niskim poziomie i przesunięciem lokalizacji wierzchołka echa przed burzą widoczną na obrazach z niskich elewacji. Źródło: Przybylinski i Gery (1983)



Ryc. 31. Klasyfikacja bow echo ze względu na formę występowania i macierzystą formę organizacji konwekcji (Klimowski i in. 2004)



Ryc. 32. Obraz CMAX z 19 lipca 2015 r. z sygnaturą bow echo, za którą występuje sygnatura RIN. Źródło: IMGW – PIB



Ryc. 33. Obraz CMAX z 19 lipca 2015 r. z rozległą linią szkwału, w którą wbudowane jest duże bow echo przechodzące w comma echo. W północnej części bow echa widoczne jest jego zawirowanie. W rejonie Kozienic obecne są dwie lewoskrętne superkomórki burzowe. Źródło: IMGW – PIB



Ryc. 34. Obraz CMAX z 19 lipca 2015 r. z rozległą linią szkwału, w którą wbudowane jest bow echo a w jego tylnej części RIN. Źródło: IMGW – PIB

Nie zawsze sygnatura bow echo pozwala na informację o zagrożeniu z odpowiednim wyprzedzeniem. Często bywa tak, że sygnatura bow echo (szczególnie w przypadku układów oddziałujących na mniejszym obszarze) jest wynikiem pojawienia się kilka – kilkanaście minut wcześniej silnych wiatrów przy powierzchni ziemi (np. 26.06.2016 r. w rejonie Paradyża oraz 19.07.2015 r. w rejonie Łosic). Jednak w przypadku dużych układów, sygnatury bow echo zazwyczaj są trwalsze niż w przypadku mniejszych układów i pozwalają z dużym wyprzedzeniem prognozować możliwe zagrożenie na znacznych obszarach.

Sygnatura bow echo podlega ewolucji tak, jak przedstawiono to na rycinie 35. W pierwszej fazie sygnatura ma kształt zbliżony do linii prostej, następnie w wyniku oddziaływania silnych prądów zstępujących ulega ona wygięciu w kształt łuku, na którego końcach mogą pojawić się zawirowania. W ostatniej fazie bow echo ulega rozpadowi poprzez utratę spójności łuku odbiciowości i wydzielenie się z niego wielu komórek. Często zdarza się również, że silny prąd zstępujący wraz ze strefą porywistego, niszczącego wiatru wyprzedzi macierzysty układ, co powoduje jego odcięcie od dostaw gorącego i wilgotnego powietrza, co prowadzi do słabnięcia takiego układu. Zdarza się również, że comma echo przekształca się w sygnaturę Mesoscale Convective Vortex (MCV)³⁶. Przedstawione na ryc. 33 i ryc. 36 układy stanowią przykłady bow-echo complex (BEC) wg klasyfikacji Klimowskiego i in. (2004). Ponadto, na ryc. 33 widoczny jest proces dobudowywania się od południowego - zachodu nowych komórek do istniejącej już linii szkwału z bow echo.

³⁶ MCV – więcej na str. 42



Ryc. 35. Ewolucja sygnatury bow echo. Źrodło: Forum Skywarn Polska, za: Fujita (1978)

Linia szkwału

W odniesieniu do odbiciowości radarowej jest to linia burz o wysokiej lub umiarkowanej odbiciowości występująca zwykle w pobliżu frontu chłodnego, lub w sprzyjających warunkach w znacznej odległości od frontu. Linia ta jest zazwyczaj dosyć spójna. Początkowo może się pojawić wiele ośrodków burzowych, które rozwijając się w jednej linii, łączą się z czasem w rozległą i spójną strukturę linii o podwyższonej odbiciowości. Niektóre burze wchodzące w skład linii szkwału mogą rozwijać sygnatury bow echo, a rozwijający się system burz budujący linię szkwału, może z czasem przekształcić się w mezoskalowy układ³⁷ bądź kompleks konwekcyjny³⁸. Linie szkwału są zazwyczaj dosyć rozległe i mają długość kilkuset kilometrów. Linii szkwału najlepiej poszukiwać na produkcie PPI lub CAPPI z dolnej troposfery, choć jest ona również dobrze widoczna na ogólnodostępnych obrazach CMAX.

Jak wskazano na ryc. 31, możliwe jest przekształcenie się superkomórki burzowej w bow echo. Taka sytuacja miała miejsce w nocy z 6 na 7 sierpnia 2012 roku na wschód od konurbacji katowickiej (ryc. 37). W południowo – wschodniej części przemieszczającej się na północny – wschód linii szkwałowej utworzyła się superkomórka burzowa mająca wyraźnie odchyloną trajektorię. Burza ta wytworzyła następnie niewielkie bow echo, w którego obrębie wiatry poczyniły znaczne szkody m.in. w gminie Klucze i Wolbrom.

³⁷ MCS – Mezoskalowy Układ Konwekcyjny - rozległa burza wielokomórkowa (tworząca się zazwyczaj z kilku lub z kilkunastu osobnych komórek burzowych), która trwa przez kilka godzin lub dłużej.

³⁸ MCC – Mezoskalowy Kompleks Konwekcyjny - rozległy wielokomórkowy układ burzowy (MCS) spełniający określone kryteria: temperatura jego wierzchołków układu musi być równa lub niższa od -32°C na obszarze co najmniej 100000 km² oraz równa lub niższa od -52°C na obszarze co najmniej 50000 km². Ponadto czas trwania układu wynosi co najmniej 6 godzin.



Ryc. 36. Linia szkwału z wbudowaną sygnaturą bow echo w obrębie mezoskalowego układu konwekcyjnego, jaki wystąpił 23 lipca 2009 r. nad Polską. Źródło: IMGW – PIB



Ryc. 37. Linia szkwału z wbudowaną na jej południowo – wschodnim krańcu superkomórką burzową, która przekształciła się w niewielką sygnaturę bow echo wraz z RIN. 06.08.2012 r. PPI (0,5°), radar Brzuchania.

LEWP (Line Echo Wave Pattern) – Złożona, mezoskalowa linia szkwałowa

LEWP to rozległa sygnatura w postaci pofalowanej linii podwyższonego echa w miejscu występowania mezoskalowej linii szkwałowej, wbudowanej w mezoskalowy system konwekcyjny (MCS) lub mezoskalowy kompleks konwekcyjny (MCC). Sygnatura LEWP widoczna jest na obrazach PPI i CAPPI obejmujących dolną troposferę oraz na obrazach CMAX (ryc. 38). LEWP stanowi zespół wielu sygnatur świadczących o możliwości wystąpienia niszczących porywów wiatru. W skład LEWP wchodzi przede wszystkim linia szkwału z sygnaturami bow echo oraz towarzyszącymi im sygnaturami RIN, MARC i BWER. W skład LEWP wchodzić może po kilka z wymienionych sygnatur. Długość LEWP może sięgać nawet ponad 500 kilometrów. LEWP występują stosunkowo rzadko ze względu na konieczność spełnienia ściśle określonych warunków synoptycznych, w których te zjawiska się formują.



Ryc. 38. Sygnatura LEWP w zachodniej Polsce 18 czerwca 2012 r. Produkt CMAX. Źródło: IMGW – PIB.

Rear Inflow Notch (RIN) - tylne wcięcie dopływu

Niewielki obszar o obniżonej odbiciowości w tylnej części sygnatury bow echo (ryc. 30, 32, 34, 37 i ryc. 39). RIN bywa również nazywany Weak Echo Channel. W obrębie jednego łuku szkwałowego możliwe jest występowanie kilku sygnatur RIN. Sygnaturę tą można obserwować na produkcie PPI albo CAPPI z niskiej bądź średniej wysokości; czasem również na produkcie CMAX. Jego wystąpienie sugeruje możliwość pojawienia się na czele bow echa niszczących porywów wiatru związanych z wyjątkowo silnym tylnym prądem dopływu (*ang. Rear Inflow Jet - RIJ*). Sygnatura powstaje w wyniku oddziaływania silnego wiatru zstępującego o stosunkowo małym przekroju, który prowadzi do wzrostu prędkości wiatru, dzięki któremu hydrometeory ulegają rozproszeniu, co powoduje spadek odbiciowości. Na obrazach prędkości radialnych w rejonie sygnatury RIN obserwowane są wysokie prędkości wiatru wiejącego w kierunku bow echa.



Ryc. 39. Fragment linii szkwału z wbudowaną sygnaturą bow echo i RIN za nim. Produkt CAPPI z wys. 1 km. 7 lipca 2015 r., radar Poznań. Źródło: IMGW – PIB.

Mid-Altidude Radial Convergence (MARC) średniotroposferyczna konwergencja radialna

Sygnatura obserwowana na produktach rozkładu prędkości radialnych w środkowej i dolnej troposferze (ok. 3 – 6 km nad ziemią). Sygnaturę tą najlepiej widać na przekrojach poprzecznych przez linię szkwału lub bow echo, ale jest też dobrze widoczna na obrazach PPI i CAPPI obejmujących podany zakres wysokości. Konwergencja jest widoczna w postaci sąsiedztwa dwóch stref o zbieżnych kierunkach wiatru widocznych jako sąsiedztwo strefy o kolorach ciepłych i strefy o kolorach chłodnych.

Na ryc. 40 przedstawiono obrazy odbiciowości i obrazy prędkości radialnych silnej linii szkwałowej, jaka przemieściła się przez woj. wielkopolskie 7 lipca 2015 r. w godzinach wieczornych. Na obrazach odbiciowości zaznaczyła się obecność linii szkwału z wbudowaną sygnaturą bow echo (produkt CAPPI 1 km). Z kolei na przekrojach odbiciowości występuje charakterystyczny dla przedniej części szkwałów nawis, którego obecność warunkowana jest przez silny prąd wstępujący (ryc. 40). Na niskim poziomie obserwowany jest również silny poziomy gradient odbiciowości.



Ryc. 40. Struktura linii szkwału w miejscu występowania sygnatury bow echo. Przed sygnaturą bow echo widoczny jest nawis odbiciowości nad obszarem słabego echa a za nim RIN. Na obrazach prędkości radialnych w miejscu RIN występują wysokie prędkości radialne związane z RIJ, który wraz ze wznoszącym się przed szkwałem powietrzem tworzy sygnaturę MARC. Źródło: IMGW – PIB. Wyidealizowany model szkwału przedstawia analogiczną strukturę (meted.ucar.edu).

W przedniej części linii szkwału lub bow echa występuje słaby wiatr wiejący w kierunku tej sygnatury, z kolei tuż za linią zlokalizowany jest silny prąd zstępujący wiejący również w jej kierunku. Silny prąd zstępujący wiejący w tylnej części linii jest prądem zimnym i po osiągnięciu ziemi prócz

szkód wywołanych swą siłą, powoduje wzmożone wznoszenie się gorących i wilgotnych mas powietrza znajdujących się przed burzą. Zarówno wspomniany prąd wznoszący, jak i prąd zstępujący osiągają znaczne prędkości w środkowej troposferze, gdy znajdują się relatywnie blisko siebie, dlatego też sygnatura MARC jest najgłębsza w podanym przedziale wysokościowym. Zazwyczaj konwergencja jest również obserwowana na obrazach z najniższej dostępnej elewacji, jednak jest ona nieco płytsza niż w środkowej troposferze. W przypadku linii szkwału i układów zawierających bow echo, dobrze widoczna jest przewaga konwergencji wiatrów w dolnej, a dywergencji w górnej troposferze.

Również na obrazach prędkości radialnych obserwowana jest struktura charakterystyczna dla linii szkwałowych. W tylnej części burzy widoczny jest silny prąd wiejący w kierunku czoła burzy, którego wysokość maleje w miarę jego zbliżania się do czoła szkwału (ciemny niebieski kolor na ryc. 40). Prąd ten to Rear Inflow Jet (RIJ), którego obecność powoduje powstawanie RIN. W przedniej części linii szkwału znajduje się strefa o niskich prędkościach wiatru, zbliżonych do zera. Strefa ta w miejscu czoła szkwałowego podnosi się a jej wysokość rośnie, w miarę oddalania się od czoła linii szkwału. Strefę tą tworzy ciepłe i wilgotne powietrze zalegające przed burzą, które zostaje uniesione pod wpływem oddziaływania silnego, chłodnego powietrza z RIJ. Powietrze to jako cięższe wypycha powietrze gorące zalegające przed nim, powodując jego stopniowe wznoszenie się (*front-to-rear flow*). Obecność silnych, przeciwstawnych kierunków przemieszczania się wspomnianych dwóch prądów powietrza w środkowej troposferze (ok. 3 - 4 km) przyczynia się do występowania na tym poziomie sygnatury konwergencji radialnej widocznej jako sygnatura MARC. Jej obecność uprawdopodabnia wystąpienie silnych wiatrów szkwałowych.

Comma echo – przecinkowe echo rotacji szkwałowej

Sygnatura w kształcie przecinka – forma, w którą przekształca się rozwinięte bow echo (ryc. 41). Po rozwinięciu się sygnatury bow echo, na obu końcach łuku tworzą się zawirowania. Ze względu na oddziaływanie siły Coriolisa, na półkuli północnej lepiej rozwija się zawirowanie północne, o ile układ burzowy przemieszcza się z zachodu na wschód (ryc. 33 i 36). Jeśli układ wędruje ze wschodu na zachód, silniejsze będzie zawirowanie południowe. Z czasem może ono, wraz z zasadniczą częścią sygnatury bow echo, przyjąć formę przecinka.



Ryc. 41. Ewolucja sygnatury bow echo wg. Fujity (1978).

W przypadku przemieszczania się bow echa na półkuli północnej z zachodu na wschód, w północnej jego części rozwija się rotacja cykloniczna, a w południowej – antycykloniczna. W miejscu występowania zawirowania (tzw. główki) sygnatury comma echo, możliwe jest uformowanie się trąby powietrznej. Taka sytuacja miała miejsce w Polsce 19 lipca 2015 roku, gdzie w północnej części silnego bow echo utworzyła się cykloniczna rotacja, w wyniku której we wsi Zawały (woj. kujawsko-pomorskie) wystąpiła krótkotrwała trąba powietrzna.

Three-Body Scattered Signature/Spike (TBSS) – kolec gradowy

Jest to stosunkowo rzadko pojawiająca się sygnatura odbiciowości sygnalizująca możliwość wystąpienia opadów dużego gradu. Sygnatura ta występuje pod dwoma postaciami. Na obrazach PPI jest to kolec wychodzący od burzy o odbiciowości do 15 dBZ o końcu skierowanym w kierunku przeciwnym do radaru (ryc. 42) stanowiącym przedłużenie promienia radaru. Z kolei na przekroju sygnatura ta widoczna jest jako *flare echo* w postaci "przestrzału" na elewacjach przechodzących przez "rdzeń" silnej odbiciowości (ryc. 43). Sygnatura TBSS jest zakłóceniem spowodowanym obecnością w obrębie komórki burzowej dużych gradzin. Przyczyniają się one do trzykrotnego odbijania i rozpraszania wiązki promieniowania wysyłanej przez radar, co powoduje niewielkie opóźnienie w dotarciu wiązki do radaru i w konsekwencji powstanie fałszywego echa za burzą. Wiązka promieniowania wyemitowana przez radar trafia w obrębie burzy na "rdzeń" zawierający gradziny. Rdzeń ten powoduje rozproszenie wiązki w kierunku ziemi, gdzie następuje jej odbicie z powrotem w kierunku "rdzenia", ponowne od niego rozproszenie i powrót sygnału z powrotem do anteny. Warunkiem powstania sygnatury jest wolna od odbiciowości przestrzeń za burzą (w stosunku do lokalizacji radaru) oraz maksymalna odbiciowość w obrębie burzy wynosząca co najmniej 60 dBZ (Wilson i Reum 1988) lub 63 dBZ (Lemon 1998).



Ryc. 42. Sygnatura TBSS powstała na burzy z opadami gradu o średnicy do 6,5 cm w warszawskiej dzielnicy Targówek. Produkt PPI (10°). Źródło: IMGW – PIB.



Ryc. 43. Sygnatura flare echo utworzona na burzy z opadami dużego gradu w woj. mazowieckim 20 maja 2015 r. Radar Legionowo. Źródło: IMGW – PIB.

Broken S-Signature – nieciągłość szkwałowa

Występująca bardzo rzadko sygnatura związana z obecnością linii szkwału, sygnalizuje możliwość wystąpienia tornada szkwałowego. Broken S-Signature występuje w sytuacji, gdy zasadnicza linia szkwału składa się z dwóch odcinków, przesuniętych względem siebie o kilka kilometrów (ryc. 44 – 45). W takiej sytuacji pomiędzy tymi liniami powstaje nieciągłość w której (podobnie jak na końcu bow echo) ma miejsce zawirowanie obserwowane czasami również na obrazach prędkości radialnych. W Polsce sygnatura ta pojawiła się co najmniej raz – 14 sierpnia 2014 r. we wsi Malawa w pobliżu Rzeszowa, gdzie wystąpiła krótkotrwała trąba powietrzna, dokładnie w miejscu lokalizacji nieciągłości szkwałowej. Należy zwrócić uwagę, że południowa część linii szkwału została silnie wytłumiona ze względu na przechodzenie tej właśnie linii nad radarem (ryc. 44).



Ryc. 44. Przykład linii szkwału z nieciągłością jej segmentów, stanowiącą Broken S-Signature. 14 sierpnia 2014 r., CAPPI (1,5 km) radar Rzeszów. W miejscu nieciągłości przeszła krótkotrwała trąba powietrzna. Źródło: IMGW - PIB



Ryc. 45. Linia szkwału z zaznaczonym fragmentem nieciągłości pomiędzy dwoma fragmentami tej linii stanowiącym Broken S-Signature. Źródło: Reinoso-Rondinel i in. (2014).

Tornadic Debris Signature (TDS), Debris Ball - Chmura szczątków

Niewielka sygnatura wysokiej odbiciowości widoczna na końcu sygnatury hook echo (ryc. 46). Jest to niezwykle rzadko występująca sygnatura sygnalizująca występowanie silnej trąby powietrznej. Wysoka odbiciowość spowodowana jest przez porwane przez wir trąby powietrznej szczątki zniszczonych lasów, budynków, hal i innej infrastruktury. Sygnatura ta osiąga niewielkie rozmiary (kilka/kilkanaście pikseli) i jest widoczna na skanie z najniższej elewacji. Ze względu na swe rozmiary, sygnatura TDS jest najlepiej obserwowalna przy pomocy radarów wysokiej rozdzielczości. TDS pojawia się podczas występowania najsilniejszych, tornad o długim i szerokim pasie zniszczeń. Trzeba jednak zauważyć, że nie każde długo trwające, silne tornado wytworzy widoczną na obrazach

radarowych sygnaturę TDS. Taka sytuacja w szczególności będzie mieć miejsce, gdy tornado będzie mocno oddalone od radaru.



Ryc. 46. Obraz superkomórki burzowej w rejonie Joplin 22 maja 2011 r. na produkcie PPI z najniższej elewacji. Po lewej stronie przedstawiono obraz odbiciowości a po prawej obraz prędkości radialnych. Na końcu sygnatury hook echo znajduje się sygnatura debris ball, w miejscu występowania której na obrazie prędkości radialnych, widoczna jest silna rotacja w postaci sygnatury TVS (bliskie sąsiedztwo dwóch skrajnych kolorów). Źródło: Wikipedia.

Tornadic Vortex Signature (TVS) – sygnatura wirowości tornadycznej

Niewielka sygnatura widoczna na obrazach prędkości radialnych z najniższej elewacji. Występujący w obrębie superkomórki burzowej mezocyklon jest rotującym prądem wstępującym, o niewielkich rozmiarach, toteż prąd ten obserwowany przez radar dopplerowski będzie widoczny w postaci znacznych prędkości wiatru o przeciwstawnych kierunkach w bliskim sąsiedztwie (ryc. 46). Sygnatura osiąga wielkość do kilku kilometrów. Sąsiedztwo intensywnego koloru ciepłego i chłodnego oznacza zatem silną rotację mezocyklonalną. W przypadku sygnatury TVS rotacja ta jest szczególnie silna, silniejsza niż w przypadku zwykłego mezocyklonu, jednak nie przesądza ona o występowaniu trąby powietrznej. Sygnatura ta pojawia się w miejscu występowania mezocyklonu tj. w tylnej części superkomórki burzowej. Wyjątkowo silna rotacja w sprzyjających warunkach synoptycznych stanowi przesłankę do stwierdzenia wysokiego prawdopodobieństwa pojawienia się trąby powietrznej.

Mesoscale Convective Vortex (MCV) – mezoskalowe zawirowanie pokonwekcyjne

MCV jest przestrzennie jedną z większych sygnatur, stanowiących duże zawirowanie w obrębie odbiciowości pozostałej po dużych, zanikających systemach konwekcyjnych (np. MCS). Taka sytuacja ma miejsce zwłaszcza w tych układach konwekcyjnych, w których obrębie występuje comma echo, którego zawirowanie inicjuje MCV (ryc. 47). Wyglądem przypomina hook echo, jednak

jego rozmiary są zdecydowanie większe. Może również zdarzyć się, że zawirowanie pokonwekcyjne powstanie po zaniku superkomórki burzowej wbudowanej w większy system konwekcyjny, gdzie inicjatorem MCV jest mezocyklon. MCV może nawet zainicjować rozwój niżu w skali synoptycznej. Obecność tej sygnatury na ogół nie świadczy o występowaniu żadnego zagrożenia, jednak może w sposób istotny wpłynąć na zmianę warunków, w jakich będzie rozwijała się konwekcja w perspektywie kilkunastu kolejnych godzin. Ważny jest zatem monitoring dynamiki tej sygnatury.



Ryc. 47. Sygnatura MCV zobrazowana na produkcie CMAX. Źródło: weather.gov

Literatura

- 1. Chisholm A.J. and J. H. Renick (1972): The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta Hail Studies 1972. Research council of Alberta Hail Studies Rep. 72-2, 24-31.
- Davies J.M. and R. H. Johns (1993): Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1: Wind shear and helicity. In: C. Church, D. Burgess, C. A. Doswell., R. Davies-Jones (eds.), The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards. Geophys. Monogr., American Geophysical Union, 79, 573 – 582.
- 3. Doswell C. A., Baker D.V., Liles C.A., 2001: Reduction of severe weather potential by mesoscale processes: A case study.
- Doswell C.A., 1994: Flash flood-producing convective storms: Current understanding and research. Proc. U.S.-Spain Workshop on Natural Hazards, Barcelona, Spain, National Science Foundation, 97 – 107.
- Doswell C.A., 1999: Seeing supercells as heavy rain producers. Preprints 13th Conf. on Hydrology, Dallas, Amer. Meteor. Soc., 73 – 76.
- Fujita T., 1973: Proposed mechanism of tornado formation from rotating thunderstorms, Proc. 8th Conference on Severe Local Storms, 15 – 17 October 1973, Boston, United States.
- 7. Fujita T., 1978: Manual downburst identification for project NIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104.
- 8. Klimowski B.A., Hjelmfelt M.R., Bunkers M.J., 2004: Radar Observations of the Early Evolution of Bow Echoes. Weather and Forecasting 19, 727 734.
- 9. Knight C.A., Knight N.C., 2001: Hailstorms. [In:] Doswell C.A.(red.), 2001: Severe Convective Storms. American Meteorological Society, Boston.
- 10. Lemon L. R., 1980: Severe thunderstorms radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. NOAA Tech. Memo.
- 11. Lemon L. R., 1998: The Radar "Three-Body Scatter Spike": An Operational Large-Hail Signature. Weather and forecasting, vol. 13: 327 340.
- 12. Markowski P.M., 2002: Hook echoes and Rear-Flank Downdrafts: A Review. Monthly Weather Review, 130, 852 876.
- 13. Pilorz W. 2014: Radarowa detekcja superkomórek burzowych w Polsce, Teledetekcja Środowiska 51, 93 105.
- Przybylinski R. W., Gery W. J., 1983: The reliability of the bow echo as an important severe weather signature. Preprints 13th Conf. on Severe Local Storms, Tulsa, OK, Amer. Meteor. Soc., 270 – 273.
- 15. Reinoso-Rondinel R., Unal C., Russchenberg H., IJpelaar T., Dufournet Y., 2014: Polarimetric weather signatures and Doppler spectral analysis of a convective squall line. ERAD 2014 the eight European Conference on Radar Meteorology and Hydrology.
- 16. Singer M., 2015: Supercela 6. mája 2015. Slovensky Hydrometeorologicky Ustav, dostęp przez stronę internetową SHMU: <u>http://www.shmu.sk/en/?page=2049&id=615</u>.
- Waldvogel A., B. Federer, P. Grimm, 1979: Criteria for the Detection of Hail Cells, J. Appl. Meteor. 18, 1521 – 1525.
- 18. Witt A. (1998), An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. Weather and Forecasting, 13, 286 303.

19. Wilson J. W., Reum D., 1988: The flare echo: Reflectivity and velocity signature. J. Atmos. Oceanic Technol., 5: 197–205

Źródła internetowe

http://www.weather.gov/crh/

http://www.weather.gov/

http://www.cimms.ou.edu/~doswell/lbbabq/lbbabq.html

http://geoinformatics.uw.edu.pl/wp-content/uploads/sites/26/2015/07/TS_v51_93_Pilorz.pdf

http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/mline/mrbw.rxml

https://www.meted.ucar.edu/

http://cimms.ou.edu/