

**ZJAWISKO DERECHO W POLSCE JAKO
NISZCZĄCA I ROZLEGŁA BURZA ZE
SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM
PRZYPADKU Z DNIA 23.07.2009.**

Autorzy:

Krzysztof Ostrowski
Artur Surowiecki

Stowarzyszenie Skywarn Polska (Polscy Łowcy Burz)
Warszawa 2010

Streszczenie

W dniu 23.07.2009 nad krajami Europy Środkowej, w tym nad Polską, przeszły potężne burze, których siła doprowadziła do poważnych strat materialnych i śmierci co najmniej 10 osób. Najbardziej gwałtowny układ burzowy utworzył się nad Czechami i częścią niemieckiego landu Saksonia. Następnie burza przesunęła się nad Polskę, gdzie wyrządziła najpoważniejsze szkody. Układ burzowy miał postać linii szkwału (a następnie *bow echo*). Nawałnica wytworzyła bardzo porywiste wiatry, przekraczające na rozległym obszarze prędkość 26 m/s, a lokalnie znacznie ponad 33 m/s, powodując miejscami całkowite zniszczenia w drzewostanie, poważne uszkodzenia i zniszczenia budynków oraz napowietrznych sieci elektrycznych. Układ konwekcyjny istniał ponad 5 godzin przemierzając w tym czasie około 500 km. Długość trasy układu burzowego oraz towarzyszący mu wiatr o potężnej sile sprawia, że spełnia on wszystkie potrzebne kryteria do określenia go mianem derecho. Niniejsze opracowanie dokładniej opisuje problematykę szczególnie groźnego typu burzy, jakim jest derecho, przedstawia warunki, w których rozwinęła się nawałnica z dnia 23.07.2009 oraz zawiera opis dotyczący poszczególnych etapów rozwoju burzy i jej skutków.

Abstract

On 23.07.2009 severe storms crossed Central Europe (including Poland) causing serious material loss and death of at least 10 people. The most intense convection developed over Czech Republic and Saxony. Afterwards, the storm moved over Poland, where it caused biggest damage. The storm system was an example of bow echo which developed from squall line. The mesoscale convective system produced severe wind gusts (>26 m/s, locally more than 33 m/s) over large area and caused in some places total destruction of forests and serious damage of buildings and electrical network. The fast-propagating MCS lasted over 5 hours and covered about 500 km. Considering the length of its damage path, this storm system should be classified as derecho. The purpose of this work is to characterize derecho producing convective systems and meteorological conditions on 23.07.2009 associated with the storm development as well as the storm outcome.

Spis treści

Wstęp.....	5
Derecho jako burza wiatrowa	6
Definicja zjawiska i przykłady.....	6
Warunki sprzyjające występowaniu derecho.....	9
Podział zjawisk derecho.....	10
Omówienie sytuacji w środkowej Europie w dniu 23.07.2009.....	12
Sytuacja synoptyczna: 23.07.2009, godz. 12 UTC.....	12
Sytuacja synoptyczna: 23.07.2009, godz. 18 UTC.....	16
Analiza warunków konwekcyjnych.....	20
Derecho Composite Parameter (DCP).....	24
Omówienie rozwoju burzy z dnia 23.07.2009 i szkód przez nią spowodowanych.....	28
Możliwość przewidzenia zjawiska.....	42
Zakończenie.....	48
Podziękowania.....	49
Przypisy.....	50

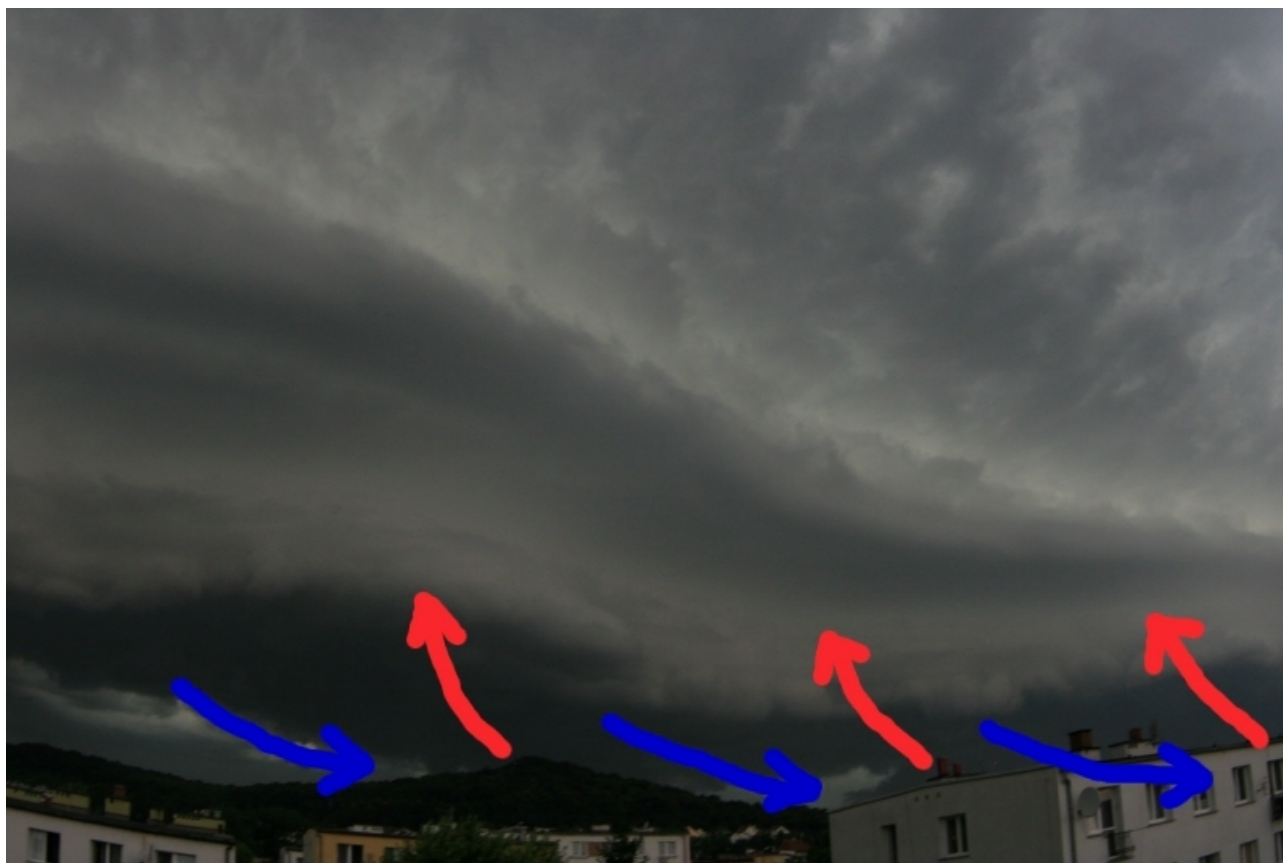
Wstęp

Silne burze pojawiające się w ciepłej porze roku nad Polską nie są zjawiskiem nietypowym dla naszej strefy klimatycznej. Nasz kraj leży w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego ze znacznym wpływem odmiany morskiej klimatu w zachodniej części kraju, oraz kontynentalnego, we wschodniej części. W porze letniej nad centralną częścią Europy dochodzi do częstych zderzeń zwrotnikowej masy powietrza, oraz znacznie chłodniejszej, polarnomorskiej masy. W rezultacie m.in. nad Polską przechodzą systemy frontów atmosferycznych, które często są poprzedzone burzami. Jednak nie każdy taki układ jest w stanie spowodować burze, które stwarzają zagrożenie dla życia ludzi, dobytku, gospodarki oraz przyrody. W dniu 23 lipca 2009 roku nad Polską oraz krajami Europy centralnej wystąpiły wyjątkowo korzystne warunki dla rozwoju silnych, niszczących burz. W rezultacie w godzinach późno popołudniowych nad Czechami, Niemcami i Polską rozwinął się potężny układ burzowy, określany jako mezoskalowy układ konwekcyjny (ang. MCS - *Mesoscale Convective System*), który spowodował największą letnią burzę wiatrową na obszarze Europy centralnej od kilku lat. W poprzednich latach burze na taką skalę o podobnym charakterze występowały m.in.: 4 lipca 2002 (Polska północno – wschodnia, Litwa, Łotwa, Estonia, Finlandia) oraz 10 lipca 2002 i 29 lipca 2005 roku nad Niemcami. Szlak zniszczeń, które spowodowała nawałnica z 23 lipca 2009 ma co najmniej 500 km długości. Pierwsze niszczące porywy wiatru pojawiły się nad Czechami północno – zachodnimi i w niemieckim landzie Saksonia. Najsilniejsze wiatry burza przynosiła prawdopodobnie w Polsce, na Dolnym Śląsku i w południowej Wielkopolsce, powodując znaczne zniszczenia. Na podstawie tych zniszczeń można ocenić przedział prędkości porywów towarzyszących nawałnicy. Wstępnie ocenia się, że szkody w niektórych miejscach były charakterystyczne dla kategorii T3 w skali oceny siły wiatru i trąb powietrznych Torro. Oznacza to, że prędkość porywów wiatru mogła przekraczać wartość 42 m/s, jednak nie była większa niż 51 m/s. W Legnicy na stacji meteorologicznej zanotowano poryw wiatru o prędkości 36 m/s. Jednak z powodu zbyt rzadkiej sieci pomiarowej prędkości wiatru w Polsce, nie zanotowano silniejszych porywów, mimo że szkody powstałe w wyniku wichury ewidentnie wskazują na znacznie wyższe prędkości wiatru. W kolejnych godzinach burza połączona z niebezpiecznymi porywami wiatru przemieściła się nad Polskę centralną, gdzie w godzinach nocnych nad północnym Mazowszem znacznie osłabła, aż w końcu zanikła. Front szkwałowy burzy (granica oddziaływania jej prądów zstępujących) dotarł jednak aż do Białegostoku w woj. podlaskim, gdzie w czasie jego przechodzenia zaobserwowano dość silne porywy wiatru (ok. 15 m/s), szkód jednak nie odnotowano. Burza, która przeszła w dniu 23 lipca 2009 nad Polską spełnia wszystkie kryteria, które kwalifikują ją jako derecho. Szlak zniszczeń powstałych na skutek burzy ciągnie się bowiem od rejonu Rudaw do okolic Warszawy, a nawet Mławy. Jest to odległość przekraczająca 460 km, która jest pierwszym kryterium oceny burzy jako derecho. Ponadto wiemy też o miejscach, gdzie wiatry w burzy przekraczały prędkość ponad 42 m/s. Na 3 stacjach zanotowano porywy wiatru przekraczające 25 m/s, ale na podstawie szkód pozostawionych przez nawałnice wynika, że tak silne porywy wiatru występowały na bardzo dużym obszarze Polski, ciągnącym się od Dolnego Śląska po Mazowsze. Dodatkowo szlak zniszczeń jest nieprzerwany. O gwałtowności i wielkości zjawiska może świadczyć również tragiczny bilans ofiar i rannych. W wyniku nawałnicy zginęło 8 osób, a 82 osoby zostały ranne. Ilość rannych, uwzględniając fakt, że liczba 82 wyraża ilość osób poddanych hospitalizacji, może być większa. W wielu miejscowościach Polski południowo – zachodniej i centralnej nawet kilkadziesiąt godzin po burzy brakowało prądu, ponieważ rozmiar szkód w energetyce powstałych na skutek nawałnicy był na tyle duży, że jedna doba nie starczyła na przywrócenie normalnych dostaw energii elektrycznej.

Derecho jako burza wiatrowa

Definicja zjawiska i przykłady

Derecho jest długo istniejącym i zazwyczaj dość rozległym mezoskalowym układem konwekcyjnym (zwykle w postaci bardziej lub mniej regularnej linii burz), który na odpowiednio dużym obszarze wytwarza bardzo silne, często niszczące porywy wiatru powstałe na skutek procesów związanych z konwekcją. Należy zaznaczyć, że wiatry te nie są związane z żadnym ruchem wirowym i wieją w linii prostej (ang. *straight-line winds*) w przeciwieństwie do tych związanych z trąbami powietrznymi. Bardzo silne podmuchy pojawiają się zazwyczaj w pierwszej fazie przechodzenia burzy i są związane z uformowaniem się na przedniej krawędzi układu burzowego tzw. frontu szkwałowego (ang. *gust front*), za którym gwałtownie napływa ochłodzone powietrze z prądów zstępujących. Tego typu układy konwekcyjne charakteryzują się zwykle dużą prędkością przemieszczania (70 km/h i więcej) i gdy nadchodzą to często można zaobserwować szybko zbliżający się (czasem niezwykle efektowny) wał chmurowy (zjawisko *Cb arcus*, ang. *shelf cloud*). Zwiastuje on pojawienie się frontu szkwałowego i bardzo silnych podmuchów.



Obrazek 1: Efektowny i groźny shelf cloud (fot. Marcin Chwała), który pojawił się późnym popołudniem 23.07.2009 na Dolnym Śląsku. Zwiastuje on nadejście frontu szkwałowego i pojawienie się gwałtownych porywów wiatru (niebieskie strzałki) związanych z prądami zstępującymi. Chłodne powietrze z prądów zstępujących napotyka na ciepłe przed burzą (czerwone strzałki) i wypycha je do góry. Ten proces jest analogiczny (ale znacznie intensywniejszy i na mniejszą skalę) do tego zachodzącego przy przechodzeniu frontu chłodnego. Tak powstała konwergencja (zbieżność wiatrów) jest ważnym „motorem” napędowym burzy i umożliwia jej dalsze istnienie – właśnie ciepłe powietrze (czerwone strzałki) tworzy prąd wstępujący niezbędny do podtrzymania układu burzowego. Warunkami sprzyjającymi długiemu istnieniu burzy jest obecność bardzo chwiejnej masy powietrza przed frontem szkwałowym oraz silne pionowe uskoki wiatru (zwłaszcza w dolnych kilku kilometrach troposfery).

Formalnie, aby zaklasyfikować burzę jako derecho muszą być spełnione warunki:

- 1) Wiatr w wielu punktach na drodze takiej nawałnicy przekracza 26 m/s (w pasie o długości przynajmniej 460 km). Jednak nie jest on stały wzdłuż całej trasy burzy. Wyróżnić można miejsca, gdzie podmuchy były znacznie słabsze, ale również takie obszary, gdzie wiatr oddziaływał z wyjątkowo dużą siłą.
- 2) Powinna istnieć wyraźna chronologia czasowa wskazująca na podmuchy spowodowane jednym układem konwekcyjnym. Chodzi o widoczną kolejność wystąpień silnych porywów wzdłuż trasy przechodzenia burzy.
- 3) Muszą istnieć przynajmniej 3 miejsca położone od siebie w odległości 74 km lub większej, w których prędkość wiatru osiągała co najmniej 33 m/s lub zniszczenia po wietrze kategorii F1 (w skali Fujity).
- 4) Między kolejnymi raportami o silnym wietrze nie może wystąpić przerwa dłuższa niż 3 godziny.

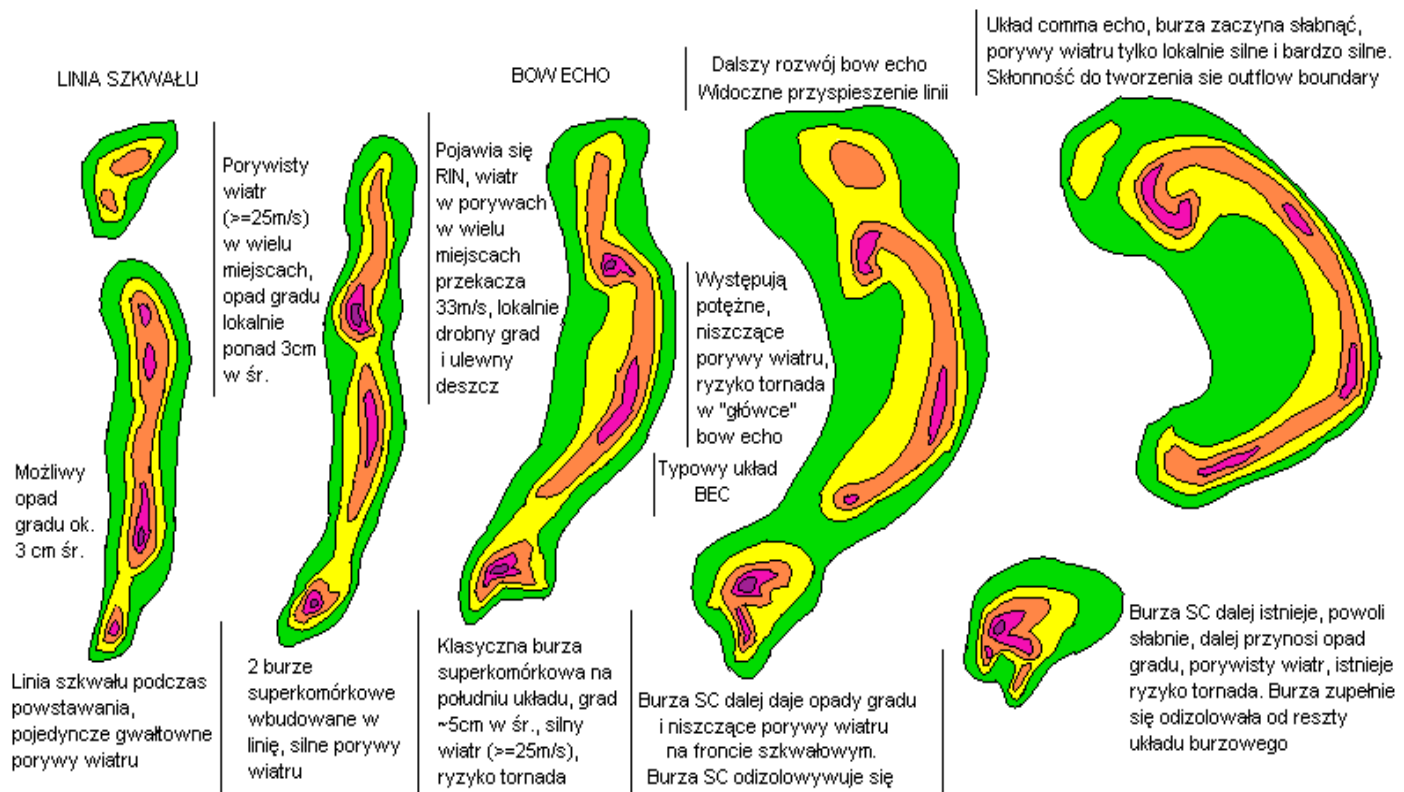
W niektórych przypadkach derecho w USA notowano wiatry, które w porywach przekraczały prędkość 200 km/h (ponad 55 m/s). W dodatku podmuchy o tak dużej sile często nie wstępowały punktowo, lecz na dość dużym obszarze, co przynosiło bardzo duże straty materialne oraz przyrodnicze. Tysiące hektarów lasów na skutek przejścia derecho w ciągu kilkunastu minut przestawały istnieć.

Najsilniejsze wiatry w derecho występują w rejonach, w których pojawiają się bardzo silne prądy zstępujące (zjawiska określane z angielskiego jako *downburst*). Takie zdarzenia mogą mieć miejsce w tej fazie rozwoju linii burz, kiedy na obrazach radarowej odbiciowości opadów pojawia się wybrzuszenie, które następnie przypomina łuk. Tak powstały układ konwekcyjny nosi nazwę *bow echo* i właśnie na jego trasie zdarzają się najsilniejsze podmuchy wiatru (i to często na dużym obszarze). Do intensyfikacji wiatrów w *bow echo* przyczynia się rozwój silnego prądu powietrznego w tylnej części burzy (ang. *rear inflow jet* w skrócie RIJ). To właśnie on jest związany z pojawieniem się na mapach odbiciowości wcięcia w tylnej części burzy (ang. *rear inflow notch* w skrócie RIN) i uformowaniem się łuku. Zdarza się, że w jednej burzy wielokomórkowej pojawia się kilka *bow echo*. Nieraz pojedyncze *bow echo* może być klasyfikowane jako derecho, gdyż jego trasa oraz siła odpowiada kryteriom tego zjawiska. Układy burzowe w formie *bow echo* pojawiają się w Polsce stosunkowo rzadko, ale zwykle wiążą się z wyjątkowo gwałtownymi zjawiskami pogodowymi.

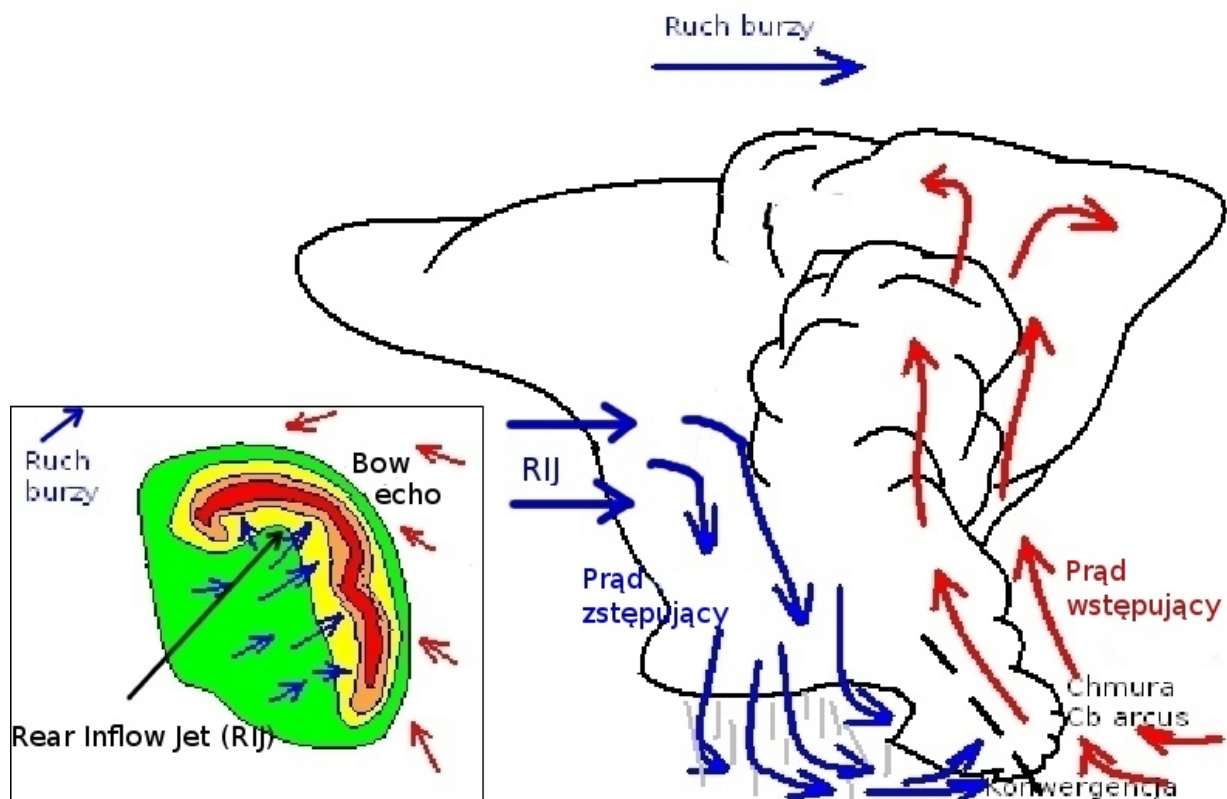
Przykładami *bow echo* w Polsce są m.in.:

- 1) Burza z porywistym wiatrem na Mazurach (określana jako „Biały szkwał”), która przeszła w dniu 21 sierpnia 2007 roku i spowodowała śmierć 12 osób.
- 2) Burza, która pojawiła się 11 maja 2009 roku nad Beskidami Zachodnimi, Podbeskidziem, w woj. małopolskim i podkarpackim. Szczególnie mocno wskutek nawałnicy ucierpiał Beskid Żywiecki.
- 3) Wszystko wskazuje na to, że tworzące się *bow echo* było przyczyną zagłady znacznej części Puszczy Piskiej w dniu 4 lipca 2002 roku. Szacowana prędkość wiatrów w tamtej burzy mogła wynosić nawet 180 km/h (50 m/s). Na wielu obszarach Puszczy Piskiej las został zrównany z ziemią, wszystkie w nim rosnące drzewa zostały wyrwione bądź połamane. Pas zniszczeń miał szerokość około 15 km i długość szacowaną na ponad 100 km (po uwzględnieniu obszarów Polski poza Puszczą, na których wystąpiła wichura). Układ konwekcyjny przeszedł następnie przez Kraje Bałtyckie czyniąc i tam szkody (notowane podmuchy do 30 m/s) i rozpadł się dopiero w południowej Finlandii (Punkka, Teittinen, 2006).

Schematyczny rysunek etapów przekształcenia się linii szkwału w bow echo



Widok z góry oraz przekrój poprzeczny bow echo



Autor grafik: Artur Surowiecki

Warunki sprzyjające występowaniu derecho

Środowiska sprzyjające derecho to takie, które faworyzują rozwój długo istniejącego i szybko poruszającego się mezoskalowego układu konwekcyjnego z silnie rozwiniętym frontem szkwałowym na jego przedniej krawędzi. Takim układem burzowym jest zazwyczaj linia szkwału często z wbudowanym jednym lub kilkoma *bow echo*.

Z analiz i badań przeprowadzanych przez amerykańskich badaczy ze *Storm Prediction Center* wynika, że zjawiska derecho pojawiają się w zróżnicowanych warunkach - zarówno biorąc pod uwagę sytuację synoptyczną, jak i przede wszystkim warunki termodynamiczne i kinematyczne (Evans, Doswell 2001). Generalnie ich rozwojowi sprzyjają:

1. **duża/bardzo duża chwiejność termodynamiczna** – przyczynia się do występowania silnych prądów wstępujących i wspomaga procesy formowania się *bow echo*, umożliwia rozwój gwałtownych prądów zstępujących (zwłaszcza typu *wet microburst*).
2. **umiarkowane/silne pionowe uskoki wiatru** - zapewniają dobrą organizację burzy wielokomórkowej i separację prądów: wstępującego i zstępującego. Silniejsze uskoki wiatru w dolnych kilometrach troposfery pozytywnie wpływają na rozwój nowych komórek na przedniej krawędzi układu burzowego oraz na dłuższe istnienie i intensywność burzy.
3. **odpowiednio silny przepływ** zwłaszcza w środkowej i dolnej troposferze – intensyfikuje porywy wiatru oraz zapewnia dużą szybkość przemieszczania się układu konwekcyjnego (co tworzy silną konwergencję na froncie szkwałowym burzy).
4. **potencjał do wytwarzania silnych prądów zstępujących** bezpośrednio wpływających na gwałtowność podmuchów. Zwiększa się on np. w przypadku obecności suchego powietrza w środkowej troposferze, dużych pionowych gradientów temperatury i wysokiego poziomu kondensacji.
5. **mechanizm wspomagający inicjację zjawisk konwekcyjnych w jednej linii** – jest nim często konwergencja w dolnej troposferze. W wielu przypadkach front chłodny, zafalowanie lub zatoka niżowa przyczynia się do „przełamania” warstwy hamującej konwekcję (obecnej często przy napływie powietrza PZm) i do pojawienia się linii komórek burzowych. W taki sposób zwykle powstają linie szkwału i *bow echo*. To bardzo ważny czynnik determinujący pojawienie się burz wielokomórkowych. W przypadku braku wyraźnego wspomagania konwekcji w środowisku z silnymi uskokami wiatru burze mogą zorganizować się w inny sposób (np. w superkomórki) lub nie rozwinąć się wcale.
6. **napływ chwiejnej masy na drodze układu burzowego** – umożliwia to długie istnienie mezoskalowego układu konwekcyjnego i zwiększa szanse na derecho. Ważną rolę odgrywa tu adwekcja ciepłej i wilgotnej masy powietrza przed frontem chłodnym.

Środowisko sprzyjające rozwojowi silnych nawałnic (w szczególności derecho) pojawia się zwykle w rejonie, gdzie spotykają się dwie, znacznie zróżnicowane termicznie masy powietrza, a ciepła masa ma dużą wilgotność właściwą w dolnej warstwie. Wyraźny poziomy kontrast termiczny występujący zarówno w dolnych jak i w środkowych warstwach troposfery przyczynia się zwykle do pojawienia się silnego i rosnącego z wysokością troposferycznego przepływu (składowa wiatru termicznego) oraz dużych pionowych uskoków wiatru. Znaczna pozioma różnica temperatury w dolnej troposferze może intensyfikować przedfrontowy napływ gorącej i chwiejnej masy powietrza w dolnej troposferze. Taki silny napływ (ang. *low level jet*) zwiększa gwałtowność procesów w strefie frontowej i czas istnienia układów burzowych. Skutkuje on pojawieniem się silnych dolnotroposferycznych uskoków wiatru oraz zwiększeniem pionowego gradientu temperatury (adwekcja ciepła na dole), co w połączeniu z wysoką zawartością pary wodnej w warstwie granicznej skutkuje znaczną chwiejnością termodynamiczną.

Na obszarach styku dwóch zróżnicowanych termicznie mas często występuje prąd strumieniowy w wyższych warstwach - on ma jednak większe znaczenie dla rozwoju długo istniejących superkomórek z trąbami powietrznymi. Dodatkowym czynnikiem jest obecność suchszego powietrza powyżej warstwy granicznej, co (wraz z dużym pionowym gradientem temperatury) daje większy potencjał silnych konwekcyjnych podmuchów wiatru. W strefie styku dwóch zróżnicowanych termicznie mas powietrza pojawia się front atmosferyczny, który często przyczynia się do inicjacji zjawisk konwekcyjnych w jednej linii.

Podział zjawisk derecho

Ze względu na strukturę i warunki powstawania derecho podzielono w USA na 3 grupy (Johns, Hirt, 1987):

1. **Progresywne derecho** (ang. *progressive derecho*) - burza rozwija się zwykle z jednego zjawiska *bow echo* lub gdy kilka mniejszych segmentów *bow echo* łączy się w jeden większy. Taki układ konwekcyjny zwykle nie powoduje spustoszeń w szerszym pasie, niż ok. 50 - 200 km, ale długość szlaku zniszczeń może osiągać ponad 1000 km. Tego typu derecho powstaje często wzdłuż pofalowanych frontów atmosferycznych. Szczególnie długie szlaki zniszczeń po derecho progresywnym obserwuje się w Stanach Zjednoczonych, gdzie dodatkowym czynnikiem wzmacniającym burze jest ukształtowanie geograficzne kontynentu. Góry ułożone południkowo, równiny ciągnące przez tysiące km bardzo sprzyjają gwałtowniejszym zderzeniom się dwóch mas powietrza oraz długo żyjącym, gwałtownym burzom. Niektóre burze w USA trwają ponad 48 godzin. W tym czasie potrafią przejść przez kilka stanów. Przykładem progresywnej odmiany derecho może być burza, która 4 lipca 2002 zniszczyła znaczną część Puszczy Piskiej i przeszła przez kraje bałtyckie.
2. **Seryjne derecho** (ang. *serial derecho*) - składa się co najmniej z dwóch segmentów *bow echo* wbudowanych w linie szkwałową. Przechodzi też nad znacznie większym obszarem niż typ progresywny. Zwykle pojawia się w pobliżu głębokiego i szybko się przemieszczającego niżu z frontami atmosferycznymi. Zazwyczaj rozwija się wzdłuż frontu chłodnego. W Europie seryjne derecho przeszło m.in. podczas orkanu Kyrill. Zjawisko wywołało nasilenie i tak bardzo silnych wiatrów związanych z samym układem niżowym, spowodowało też wystąpienie kilku trąb powietrznych, co nie należy do rzadkości w tym typie derecho. W Stanach Zjednoczonych seryjne derecho potrafi ciągnąć się przez kilka stanów, zwykle z północnego – wschodu na południowy zachód. Nawałnica na swoim szlaku o szerokości kilkuset lub więcej kilometrów powoduje zniszczenia o różnej wielkości..
3. **Hybrydowe derecho** (ang. *hybrid derecho*) - wykazuje ono zarówno cechy seryjnego, jak i progresywnego typu derecho. Przykładem tego typu może być derecho, które przeszło nad USA w dniu 30 – 31 maja 1998 roku. Burza się wytworzyła przy głębokim i szybko wędrującym ośrodku niskiego ciśnienia, jednak mimo tego wykazywała bardzo wiele cech charakterystycznych dla progresywnej odmiany zjawiska.

Inny podział derecho odnosi się przede wszystkim do warunków powstawania (Evans, Doswell, 2001):

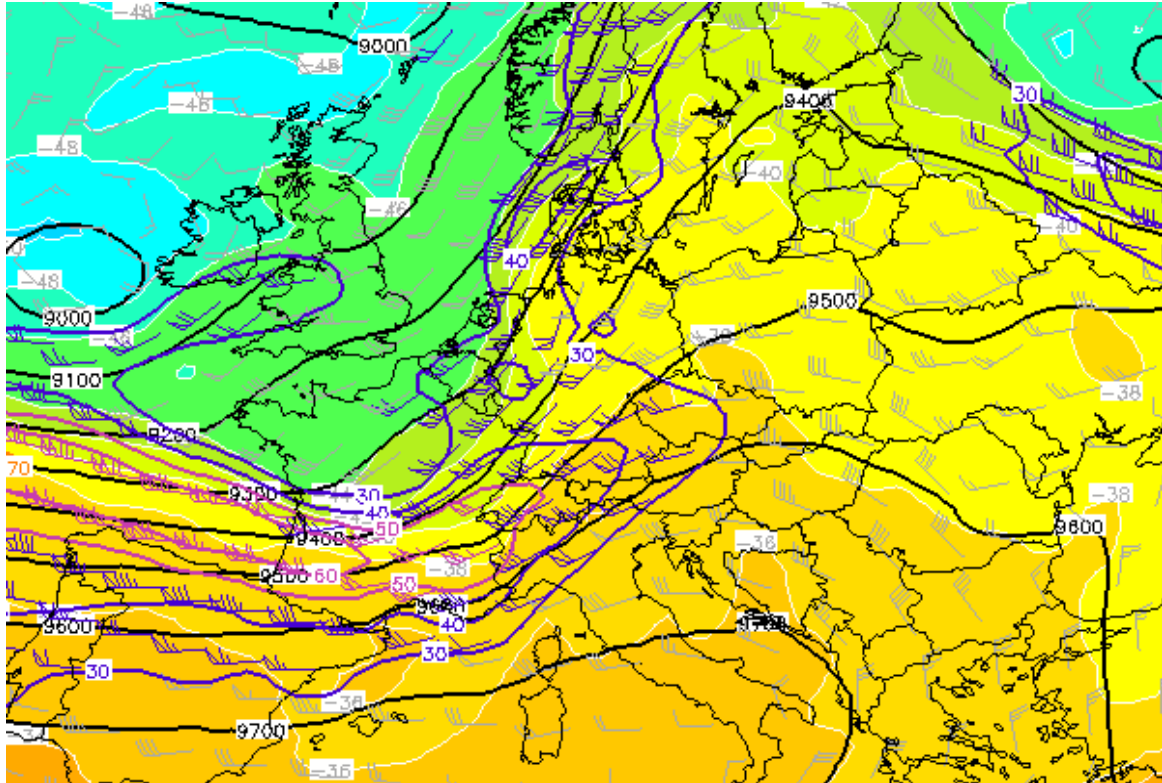
1. **Derecho ze słabym wymuszaniem (ang. *weak forcing derecho*, *WF derecho*)** – powstają w środowisku, gdzie brakuje silnego mechanizmu wymuszającego konwekcję (głębokiego układu niżowego z frontami i krótkiej fali środkowotroposferycznej). Tego typu układy burzowe rozwijają się zwykle w rejonach, gdzie występuje bardzo duża chwiejność termodynamiczna i duży potencjał do generowania silnych prądów zstępujących, a przepływ w troposferze i uskoki wiatru są na umiarkowanym poziomie. W tych przypadkach na rozwój niszczących podmuchów większy wpływ mają więc czynniki termodynamiczne.
2. **Derecho z silnym wymuszaniem (ang. *strong forcing derecho*, *SF derecho*)** – powstają w obecności intensywnego układu niżowego z frontem chłodnym i krótkiej fali środkowotroposferycznej. Tego typu środowiska wyróżniają się zwykle silnym przepływem we wszystkich warstwach troposfery i dużymi uskokami wiatru. Chwiejność może być w tych przypadkach umiarkowana (w ekstremalnych przypadkach nawet niewielka). Rozwój niszczących konwekcyjnych podmuchów jest tu w dużej mierze związany z czynnikami kinematycznymi.
3. **Derecho hybrydowe (ang. *hybrid derecho*)** – derecho wykazujące cechy obu powyższych rodzajów lub formy pośrednie, których nie można zaklasyfikować jednoznacznie.

W praktyce derecho progresywne często powstaje w warunkach słabszego wymuszania, natomiast derecho seryjne formuje się w obecności silniejszego wymuszania.

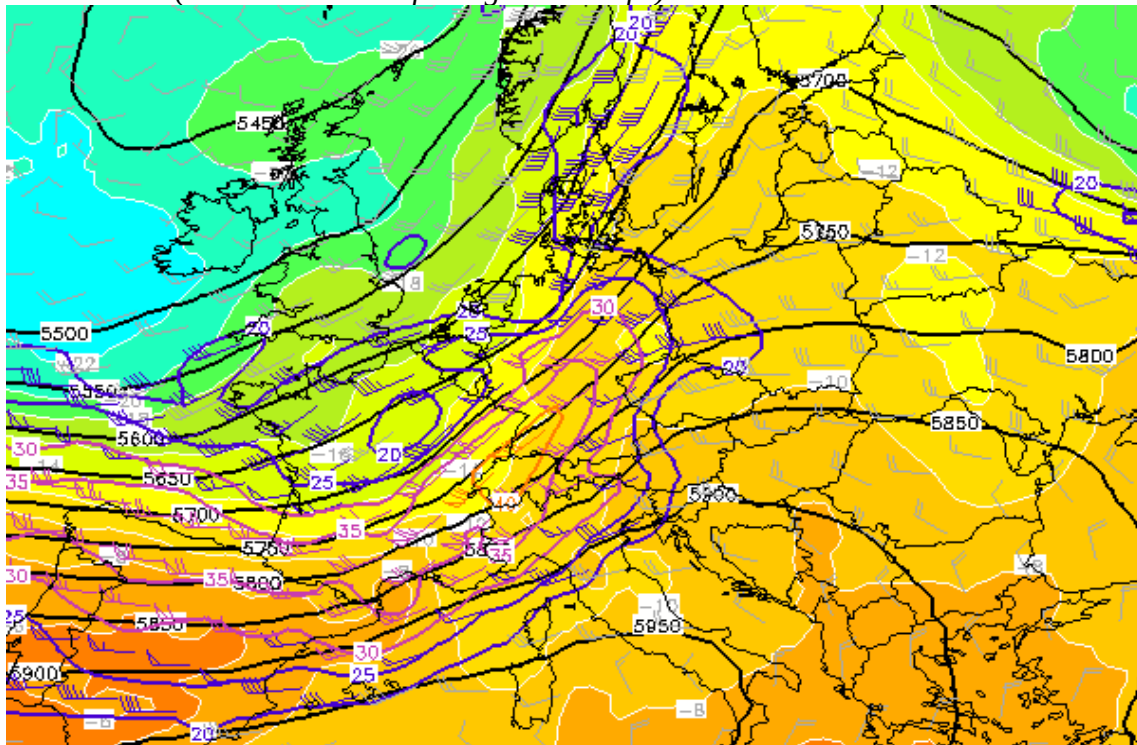
Omówienie sytuacji w środkowej Europie w dniu 23.07.2009

Sytuacja synoptyczna: 23.07.2009, godz. 12 UTC

Mapa TB 300 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):

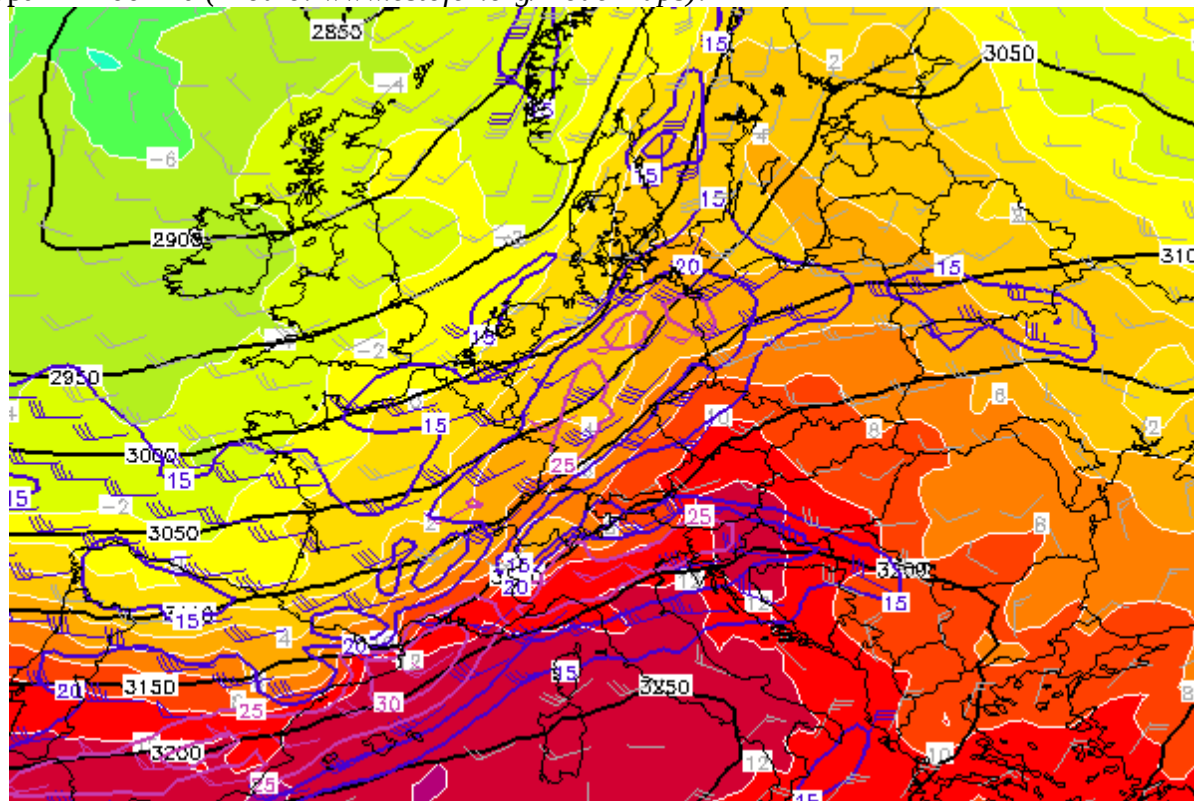


Mapa TB 500 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):

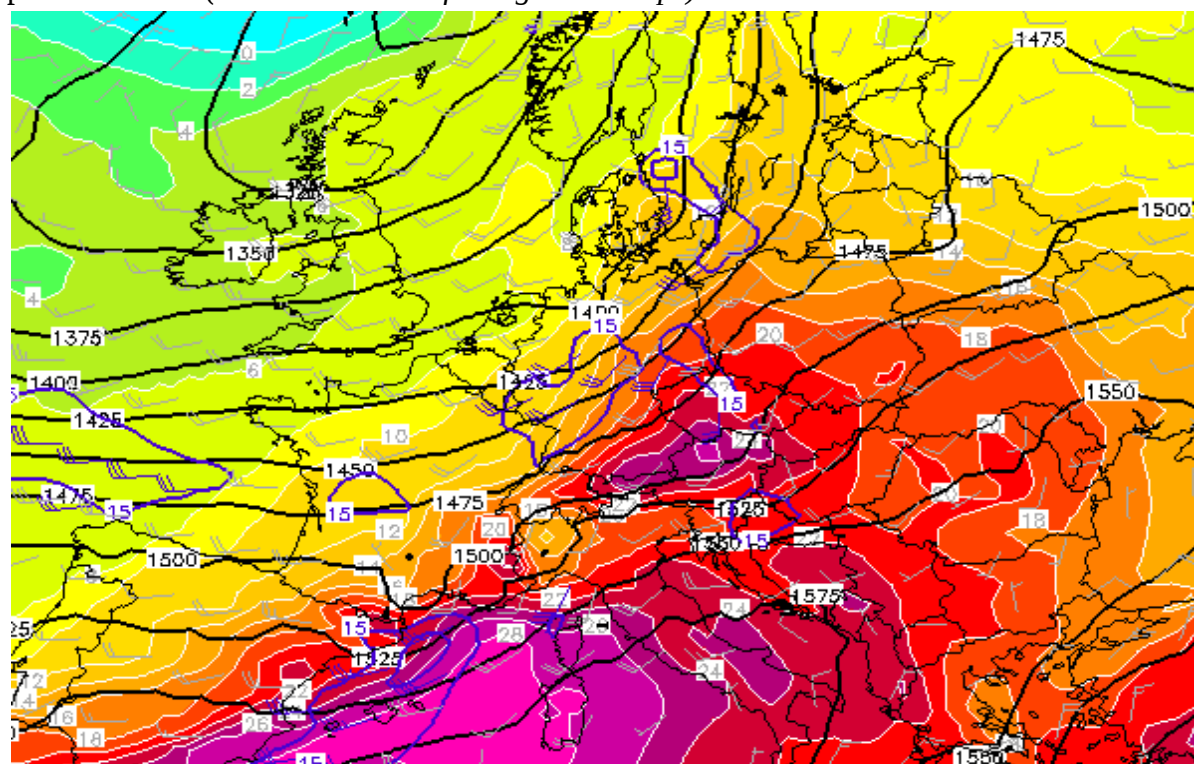


Do Polski wyraźnie zbliżała się z południowo-zachodu długa fala z silnym prądem strumieniowym (z wiatrem w rdzeniu do 60 m/s – południe Francji). Wiatr o prędkości 30 m/s (300 hPa) i 25 m/s (500 hPa) występował już blisko południowo-zachodniej części kraju. Już na tak znacznych wysokościach zarysowany jest poziomy kontrast termiczny.

Mapa TB 700 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):

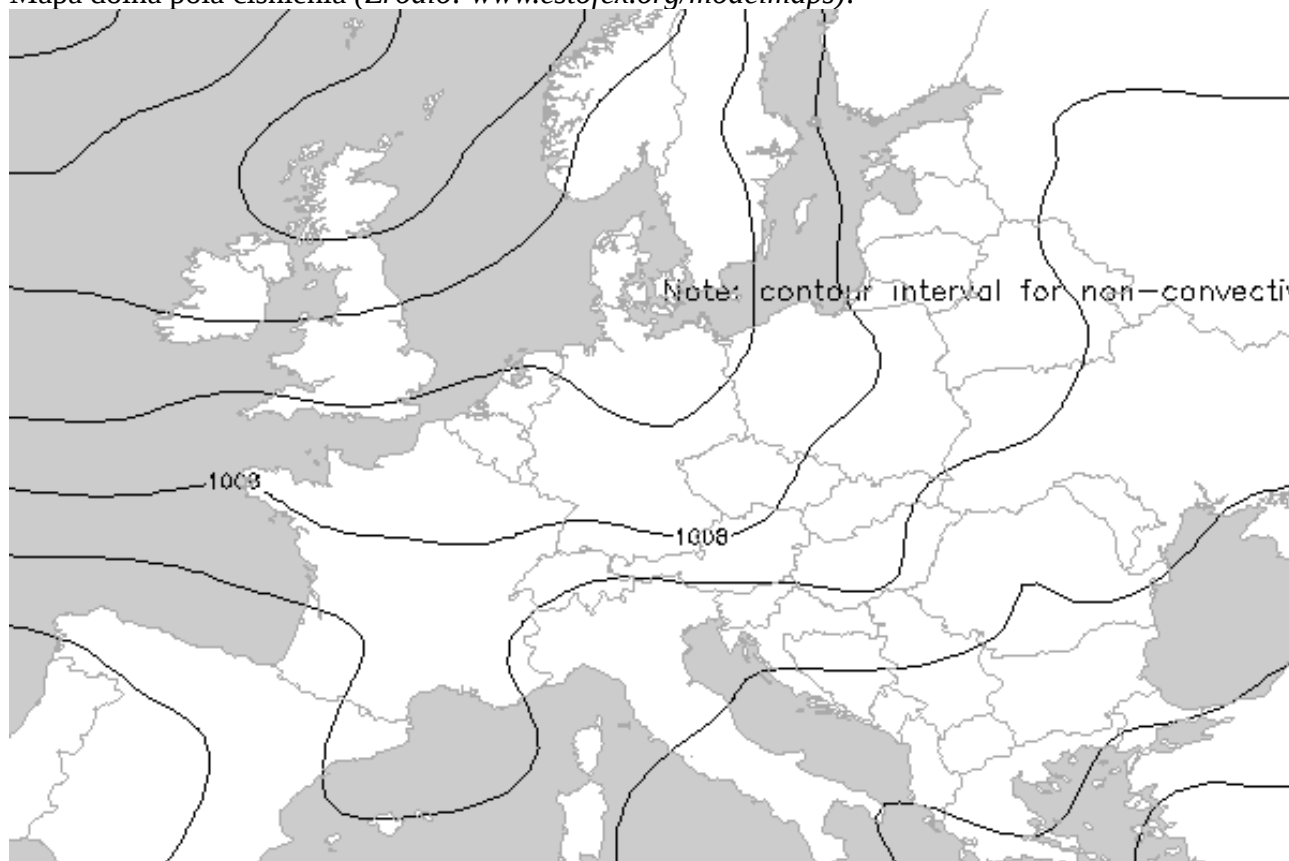


Mapa TB 850 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):



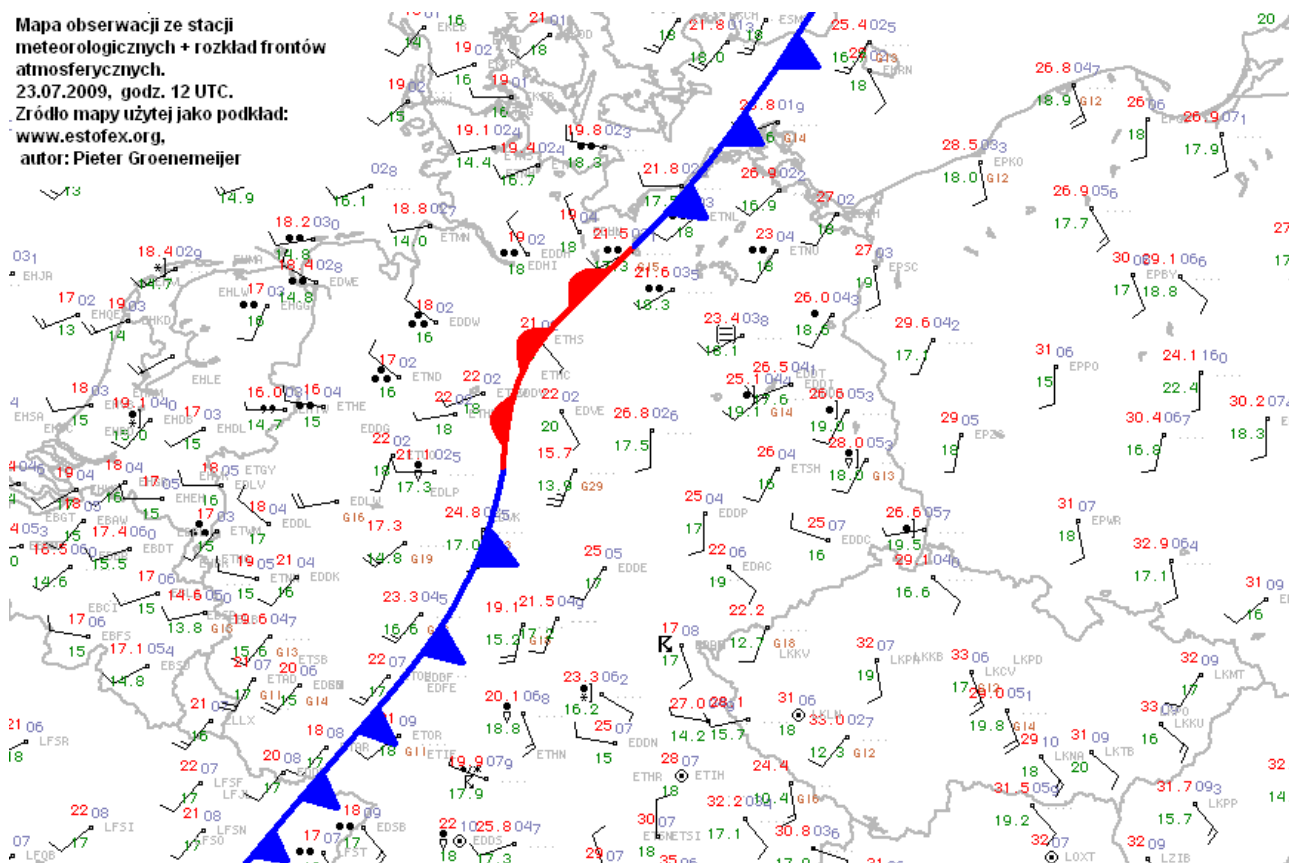
Mapy TB 700 hPa i TB 850 hPa wskazują, że do Polski napływa z Czech zwrotnikowa, gorąca masa powietrza (ponad 20 stopni na poziomie 850 hPa). Ten napływ jest dość intensywny (15 m/s na 850 hPa). Zwraca uwagę duży poziomy kontrast termiczny między tą masą, a powietrzem polarnomorskim w Europie zachodniej. Przykładowo różnica w temperaturach między pograniczem czesko-austriackim, a zachodnimi Niemcami to aż 16 stopni na poziomie 850 hPa i 8 stopni na poziomie 700 hPa. Strefa frontowa (w postaci zafalowania) jest więc bardzo wyraźnie zaznaczona nad Niemcami. Tak duże kontrasty temperatury w dolnych kilku kilometrach troposfery miały wpływ na pojawienie się wcześniej omówionego prądu strumieniowego i silnych środkowotroposferycznych wiatrów – już na poziomie 700 hPa występuje w Polsce przepływ 15-25 m/s. W konsekwencji wystąpiły znaczne prędkościowe uskoki wiatru.

Mapa dolna pola ciśnienia (*Źródło: www.estofex.org/modelmaps*):



Polska dostaje się pod wpływ niżu z centrum nad Morzem Północnym. Nad Niemcami w strefie pofalowanego frontu obserwuje się formowanie zatoki niżowej. W rejonie Cieśnin Duńskich tworzy się ośrodek niskiego ciśnienia.

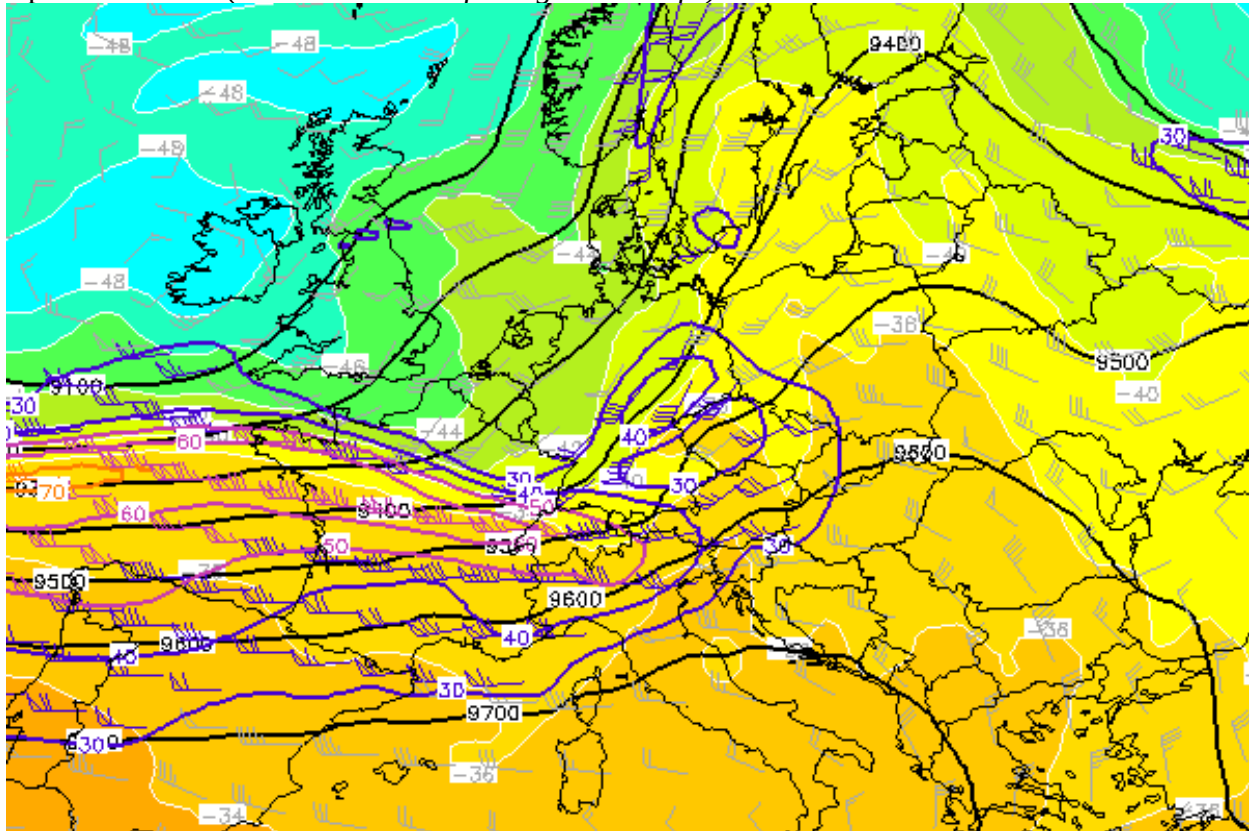
Mapa obserwacji ze stacji (dostosowana przez autorów na potrzeby opracowania):



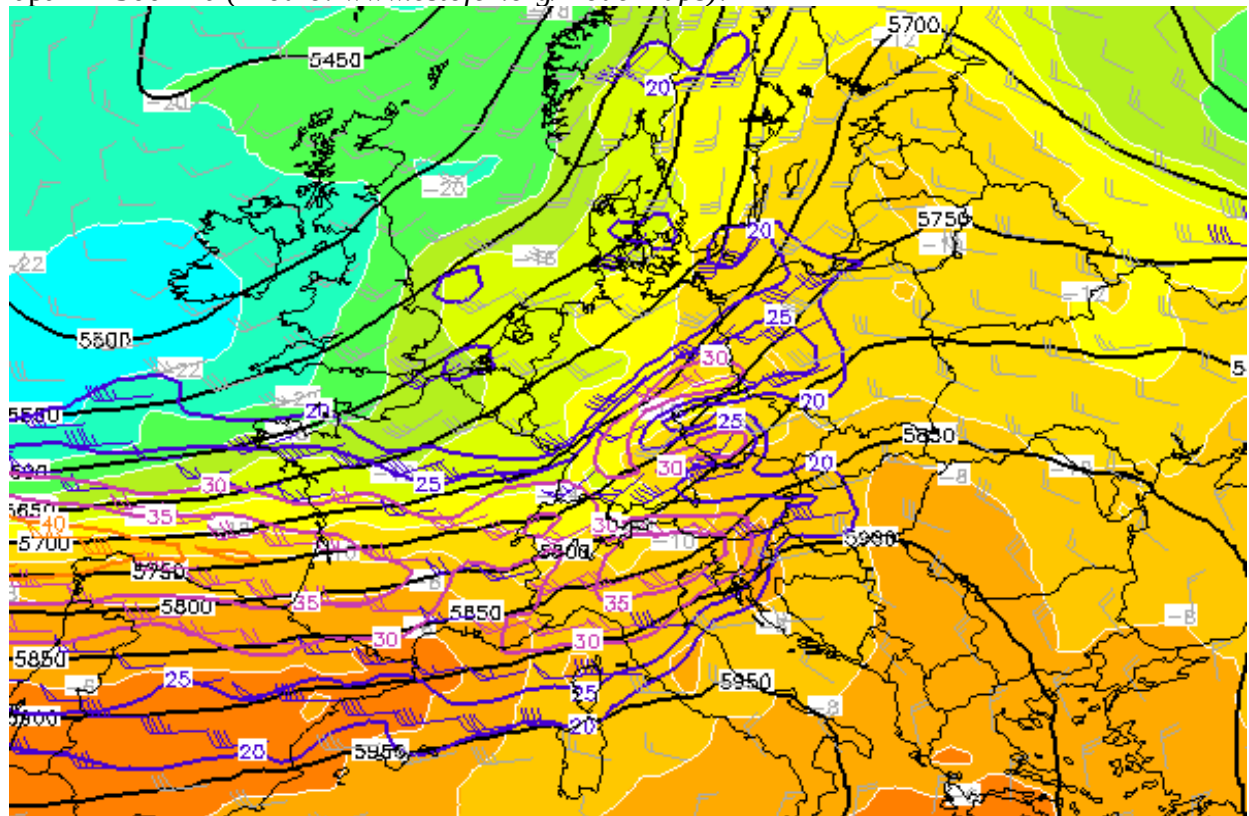
Nad Niemcami widoczny jest pofalowany front atmosferyczny. W Polsce, Czechach i południowych Niemczech upały (30-35 stopni), natomiast za strefą frontową (zachodnie Niemcy, Holandia, Belgia) temperatury rzędu 16-20 stopni. W Polsce południowo-zachodniej, Czechach i wschodnich Niemczech zawartość pary wodnej w powietrzu jest znaczna (p. rosy 18-20 stopni).

Sytuacja synoptyczna: 23.07.2009, godz. 18 UTC

Mapa TB 300 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):

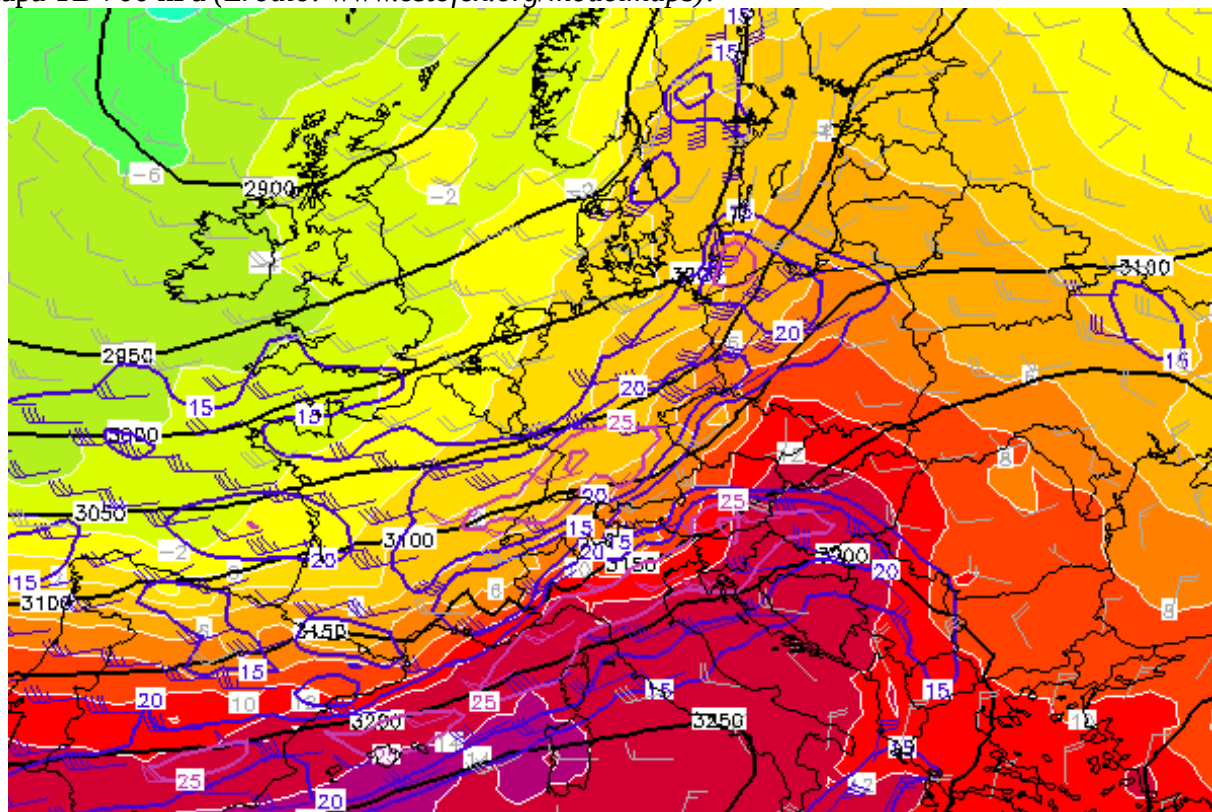


Mapa TB 500 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):

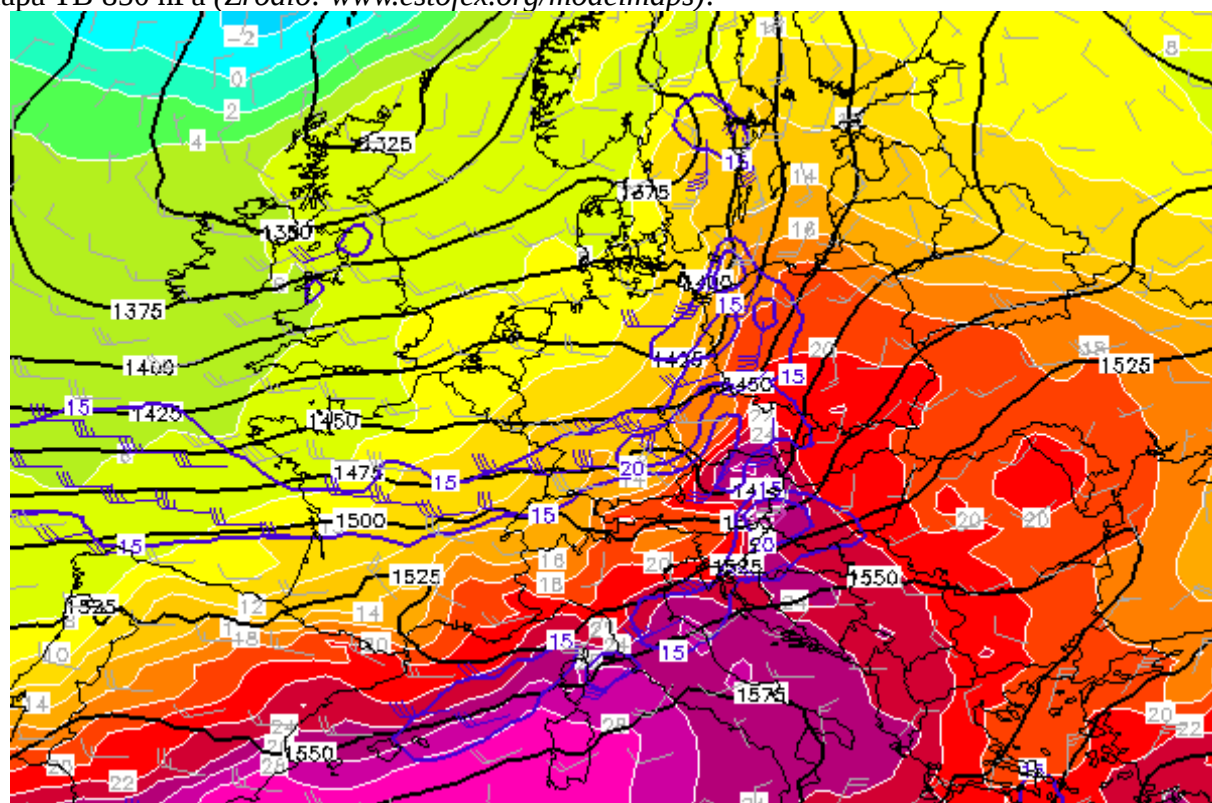


Po 6 godzinach widać, że fala zbliżyła się do naszego kraju, a prąd strumieniowy (z wiatrem powyżej 30 m/s na 300 hPa i powyżej 25 m/s na 500 hPa) pojawił się nad Polską południowo zachodnią.

Mapa TB 700 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):

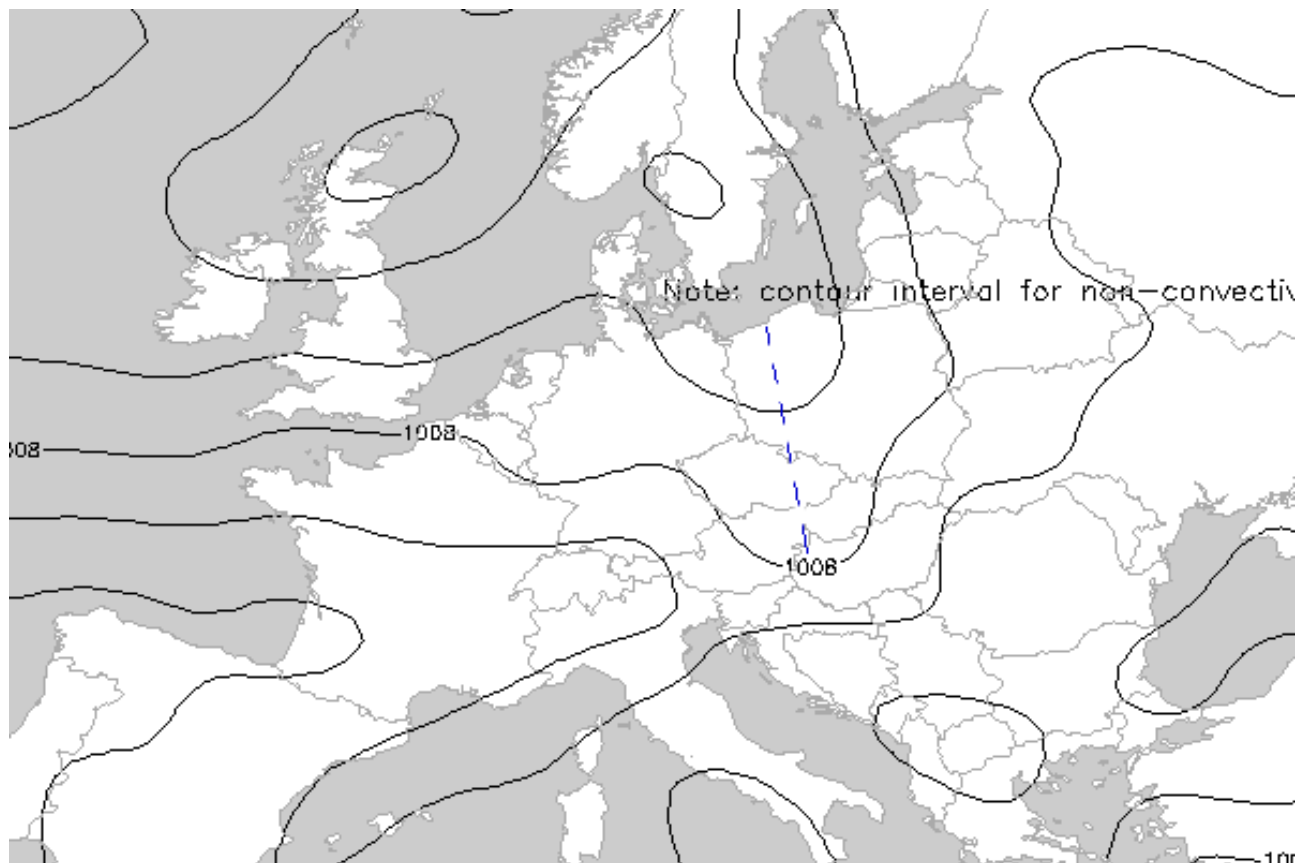


Mapa TB 850 hPa (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):



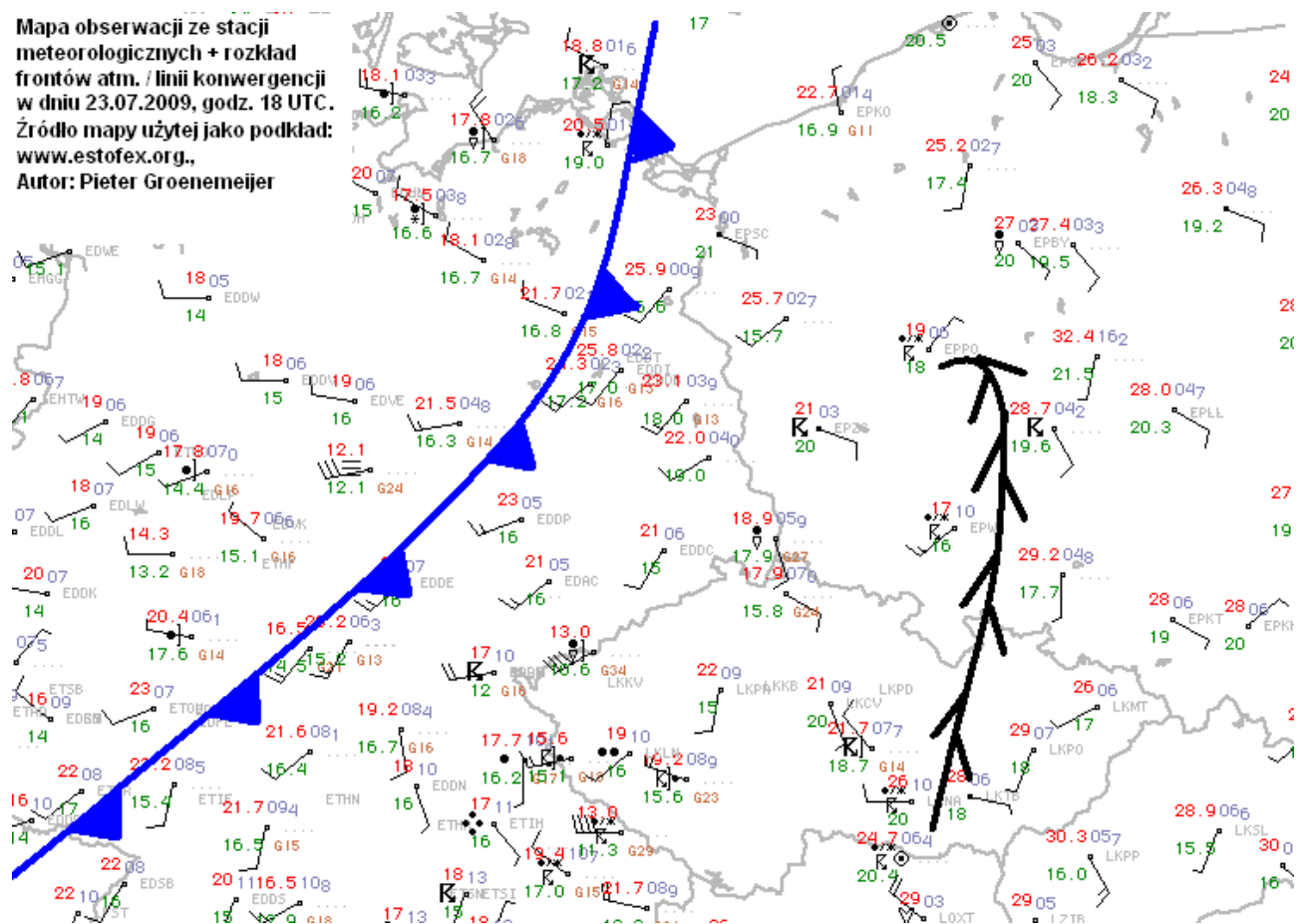
Po 6 godzinach kontrast termiczny najwyraźniej jest widoczny już nad Czechami – chłodna masa zaczyna szybko wypierać gorącą na wschód, niedawno ukształtowany front chłodny zbliża się od zachodu do Polski. Zwraca uwagę wyraźna zatoka niżowa widoczna na mapie TB 850 hPa i wciąż silny, przedfrontowy napływ do Polski gorącej masy powietrza.

Mapa dolna pola ciśnienia (Źródło: www.estofex.org/modelmaps):



Można zauważyć nowo utworzony układ niżowy nad południową Szwecją i wyraźną zatokę niżową (jej oś zaznaczona przerywaną linią). Jej wystąpienie mogło odegrać kluczową rolę w procesie inicjacji zjawisk konwekcyjnych.

Mapa obserwacji ze stacji meteorologicznych + rozkład frontów atm. / linii konwergencji w dniu 23.07.2009, godz. 18 UTC.
Źródło mapy użytej jako podkład: www.estofex.org,
Autor: Pieter Groenemeijer



19

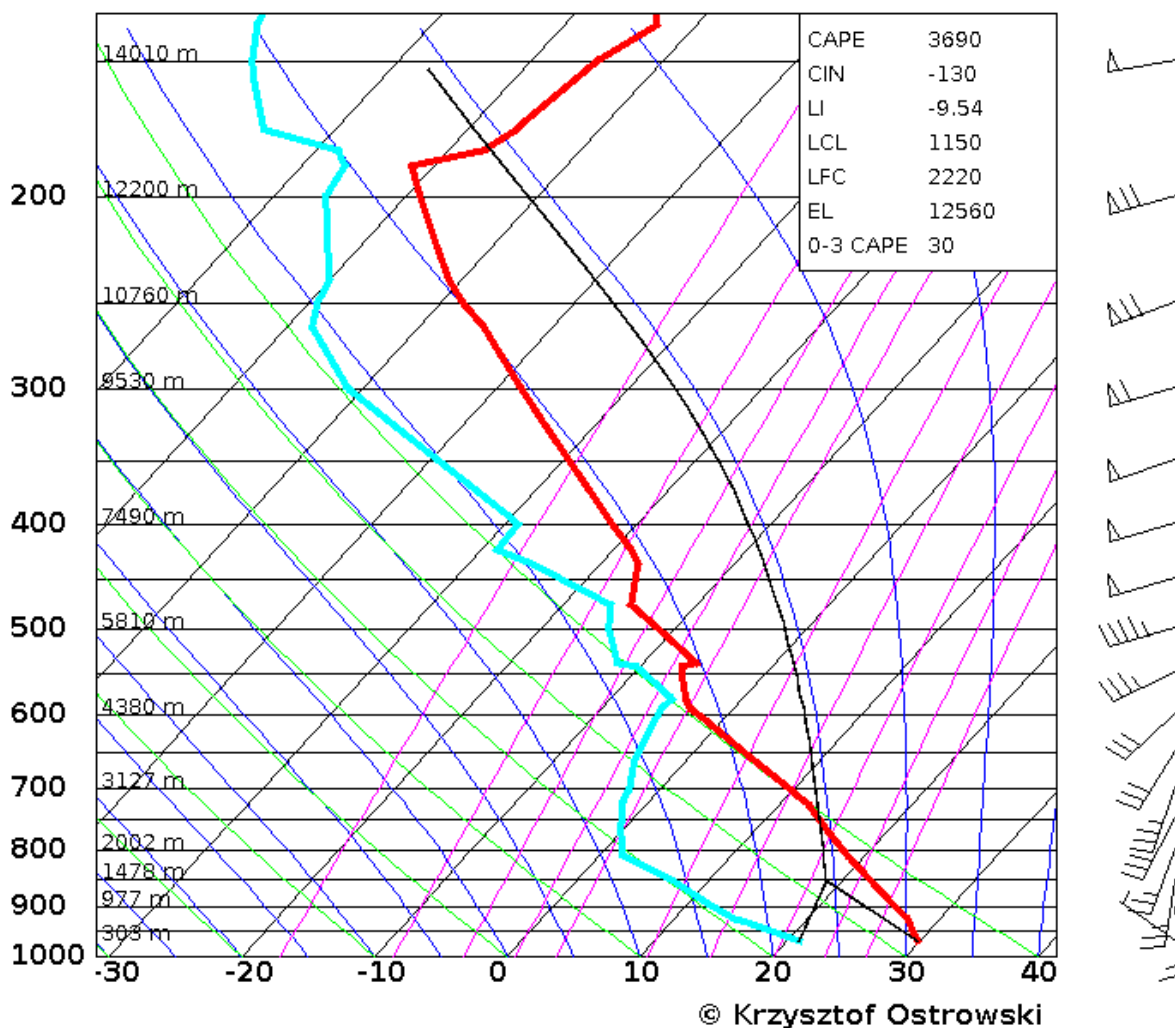
Analiza warunków konwekcyjnych

Analiza radiosondażu: Praga, 23.07.2009, godz. 12 UTC

Do analizy sytuacji pod kątem warunków rozwoju gwałtownych burz zostaną wykorzystane dane z Pragi. Biorąc pod uwagę napływ gorącej i chwiejnej masy z południa oraz fakt, że wraz z wysokością wiatr skręcał z kierunku południowego do zachodniego, należy przypuszczać, że te dane pomiarowe dość dobrze oddają warunki jakie miały miejsce kilka godzin później w Polsce południowo-zachodniej bezpośrednio przed uderzeniem nawałnicy. Oto radiosondaż:

11520 Praga

2009-07-23 12Z



Sondaż pokazuje, w jak gorącej, zwrotnikowej masie powietrza były dokonywane pomiary (22 stopni na poziomie 850 hPa). Napływ z południa jest dość silny (14 m/s na 850 hPa), co skutkuje wzrostem temperatury na tym poziomie o 2,4 stopnia w 6 godzin (wyrażna adwekcja ciepła między 6 i 12 UTC). Jednocześnie na wysokości 500 hPa kierunek wiatru zbliżony jest do zachodniego i nie obserwuje się napływu ciepła. Między innymi takie zróżnicowanie adwekcji na różnych poziomach troposfery (ang. *differential advection*) przyczyniło się do wzrostu pionowego gradientu temperatury.

Warunki termodynamiczne

Wskutek obecności gorącej masy powietrza i nasłonecznienia, przy powierzchni ziemi temperatura osiągała 30 stopni. Należy zwrócić uwagę na wysoką temperaturę punktu rosy (21 stopni) – świadczy to o bardzo dużej zawartości pary wodnej w warstwie przyziemnej.

Kolejnym istotnym elementem jest bardzo znaczny pionowy gradient temperatury: w warstwie 2-4 km nad ziemią równy 8,6 stopnia na kilometr. Między poziomami 700 i 600 hPa występuje nawet gradient suchoadiabatyczny - pojawiła się uniesiona warstwa wymieszana (EML z angielskiego *elevated mixed layer*).

Powyższe czynniki przyczyniły się do wystąpienia wręcz ekstremalnej chwiejności termodynamicznej: SBCAPE osiągnęło wartość niemal 3700 J/kg. Należy zanotować spadek wilgotności właściwej wraz z wysokością w dolnej troposferze, stąd MLCAPE było mniejsze – odpowiednio 2469 J/kg (z warstwy 0-500 m) i 1798 J/kg (z warstwy 0-1 km). To jednak wciąż wartości bardzo duże i rzadkie w naszym rejonie.

Nie wszystkie elementy sprzyjały jednak inicjacji zjawisk burzowych. Istniała istotna warstwa hamująca konwekcję (CIN w zależności od sposobu liczenia wynosił od -130 do -160 J/kg). W związku z niską wilgotnością względną w warstwie granicznej, poziom kondensacji był dość wysoki: SBLCL wynosił 1150 m, jednak MLLCL (z warstwy 0-1 km) to już 1936 m. Te czynniki skutecznie hamowały rozwój burz aż do późnego popołudnia, kiedy pojawiła się zatoka niżowa. Należy jednak dodać, że obecność warstwy hamującej ograniczyła pionowe mieszanie powietrza i pozwoliła na akumulację pary wodnej w najniższej warstwie troposfery, co zaskutkowało zwiększeniem CAPE.

Z sondażu można odczytać, że w warstwie 850-700 hPa zalegało suche powietrze – to element bardzo pomocny w wytwarzaniu silnych prądów zstępujących, szczególnie w połączeniu ze wspomnianym wcześniej bardzo dużym pionowym gradientem temperatury. Ważne znaczenie miała tu obecność warstwy EML. Poziom kondensacji jest całkiem wysoki, co przy obecności suchego powietrza poniżej podstawy chmur zwiększa dodatkowo siłę prądów zstępujących (ochładzanie przez parowanie).

Wyżej wymienione czynniki przyczyniły się do wystąpienia znacznej energii konwekcji prądów zstępujących (DCAPE) równej prawie 1000 J/kg. Różnica między temperaturą ekwiwalentno-potencjalną na powierzchni, a najniższą w środkowej troposferze (parametr delta theta-e) to niemal 28 stopni, więc wartość wskazująca na duże zagrożenie silnymi prądami zstępującymi i wiatrami z nimi związanymi.

Współczynniki HMI i WMSI, określające siłę prądów zstępujących typu *hybrid microburst* i *wet microburst*, osiągnęły również duże wartości – odpowiednio 13 i 101. Opracowana w USA tabela mówi w tej sytuacji o możliwym podmuchu 50-65 kts, czyli 25-33 m/s (Pryor). Należy dodać, że w tym przypadku wpływ na prędkość wiatru, oprócz silnych prądów zstępujących, miały czynniki kinematyczne oraz intensyfikacja podmuchów na skutek procesów zachodzących w *bow echo* (RIJ).

Warunki kinematyczne

Analizując wiatry na różnych poziomach troposfery zwraca uwagę silny i zwiększający się wraz z wysokością przepływ. Te prędkości to: 14 m/s (poziom 850 hPa), 19 m/s (poziom 700 hPa), 25 m/s (poziom 500 hPa), 32 m/s (poziom 300 hPa) i ponad 40 m/s w pobliżu tropopauzy.

Oprócz zwiększania prędkości wiatru należy zwrócić uwagę na zmianę jego kierunku od południowego na dole do zachodniego w środkowej troposferze. Występowały więc silne uskoki wiatru zarówno prędkościowe jak i kierunkowe – te drugie pełnią jednak ważniejszą rolę przy powstawaniu superkomórek burzowych.

W omawianej sytuacji wystąpił uskok wiatru w warstwie (0-6 km) równy 24 m/s oraz w warstwie (0-3 km) równy 19 m/s. To są wartości bardzo znaczne, które w połączeniu ze sprzyjającymi warunkami termodynamicznymi wskazują na zagrożenie bardzo gwałtownymi burzami z silnymi szkwałami.

W związku ze wspomnianym wcześniej silnym przepływem, średni wiatr w dolnych 6 kilometrach troposfery wynosił 15 m/s, co faworyzuje powstawanie szybko przemieszczających się, propagujących z wiatrem układów konwekcyjnych (ang. *downwind-propagating MCS*) takich jak linie szkwału czy *bow echo*. W środowisku sprzyjających warunków termodynamicznych, średni wiatr często decyduje o możliwości powstania *derecho* (Evans, Doswell 2001).

Średni wiatr (V_{sr}) z warstwy chmurowej (liczony jako średnia wektorowa wiatrów: V_{850} , V_{700} , V_{500} , V_{300}) wynosił aż 20 m/s. Druga metoda Corfidiego (Corfidi 2003) obliczająca szybkość przemieszczania się mezoskalowego układu konwekcyjnego (liczona wektorowo jako $2 \cdot V_{\text{sr}} - V_{850}$) wskazuje na bardzo dużą prędkość ponad 31 m/s z kierunku WSW – powstałe na Dolnym Śląsku *bow echo* rzeczywiście poruszało się w zbliżony sposób.

Parametry mieszane

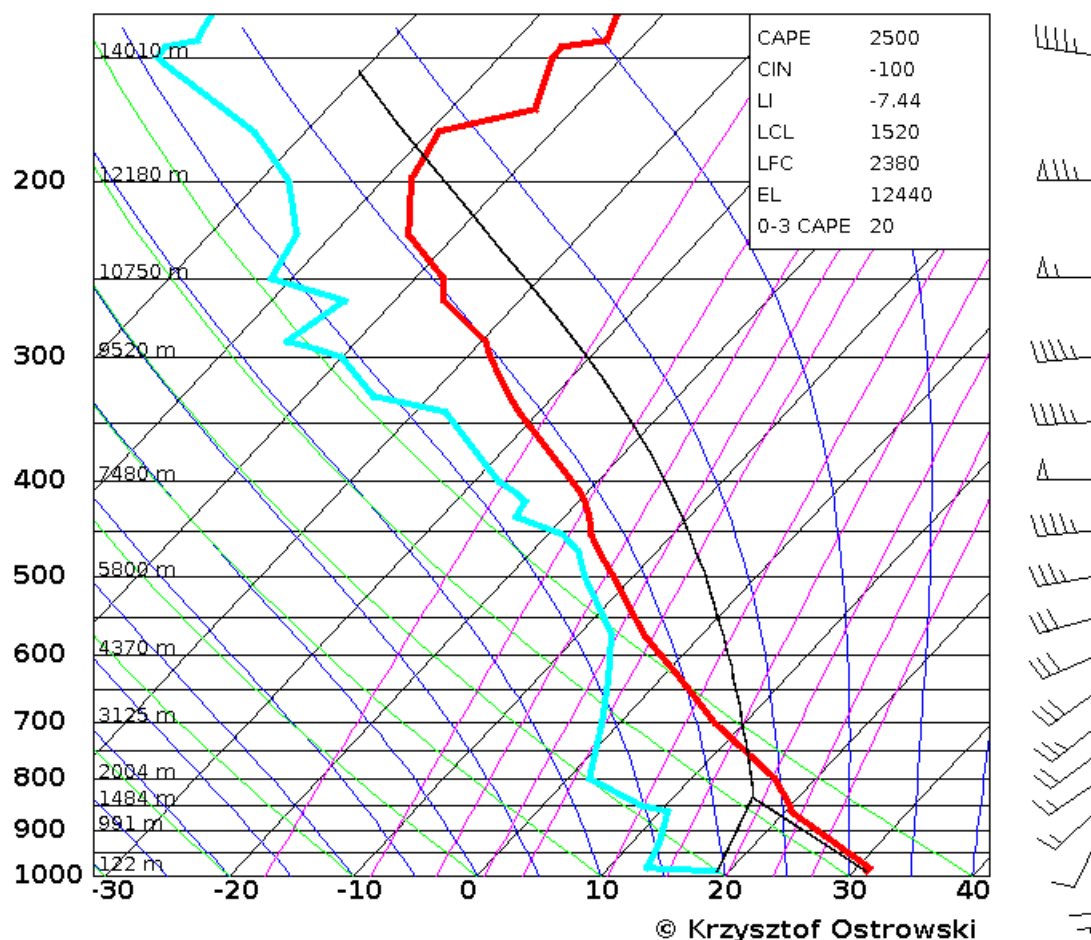
Wskaźnik DCP (szeroko omówiony w następnym rozdziale), który szacuje zagrożenie silnymi nawałnicami, osiągnął ponad 8, czyli wartość ekstremalnie wysoką.

MCS Index to parametr stworzony do oceniania warunków na powstanie mezoskalowego układu konwekcyjnego (MCS). Bierze on pod uwagę chwiejność termodynamiczną, uskok wiatru w dolnych warstwach troposfery i adwekcję ciepła. Obliczony dla Pragi wyniósł 4. Wartości powyżej 3 oznaczają warunki bardzo sprzyjające dla układów MCS.

Krótkie omówienie radiosondażu: Wrocław, 23.07.2009, godz. 12 UTC

12425 Wrocław

2009-07-23 12Z



We Wrocławiu, podobnie jak w Pradze, jest obecna gorąca masa powietrza. Główną różnicę stanowi znacznie słabszy przepływ w dolnej troposferze – najsilniejszy przedfrontowy napływ miał wówczas miejsce w Czechach.

W porównaniu z danymi z Pragi, zwraca uwagę mniejsza zawartość pary wodnej w dolnej troposferze – tutaj masa o największej chwiejności jeszcze nie napłynęła. W warstwie przyziemnej temperatura punktu rosy wynosi 20 stopni, natomiast powyżej następuje gwałtowny spadek wilgotności właściwej. Stąd SBCAPE osiąga bardzo dużą wartość 2500 J/kg, jednak MLCAPE (0-500 m) jest co najwyżej umiarkowane: 607 J/kg.

Potencjał do generowania silnych prądów zstępujących jest znaczny: duży pionowy gradient temperatury w połączeniu z suchym powietrzem powyżej warstwy granicznej i dość wysokim poziomem kondensacji powoduje, że DCAPE osiąga wartość 1077 J/kg.

Zwracają uwagę silne prędkościowe uskoki wiatru (w warstwie 0-6 km 21 m/s i w warstwie 0-3 km 13 m/s). Średni wiatr z dolnych 6 km troposfery osiągał umiarkowaną wartość niecałych 12 m/s. Warunki kinematyczne na nawałnice są więc dobre, ale nie aż tak sprzyjające jak te z Pragi. Działo się tak, ponieważ w tym momencie strefa najsilniejszego przepływu w troposferze dopiero docierała do Polski (patrz analiza synoptyczna).

Parametr DCP wyliczony dla Wrocławia osiągnął ponad 4. To najwyższa wartość obliczona dla wrocławskich sondaży w ostatnich latach.

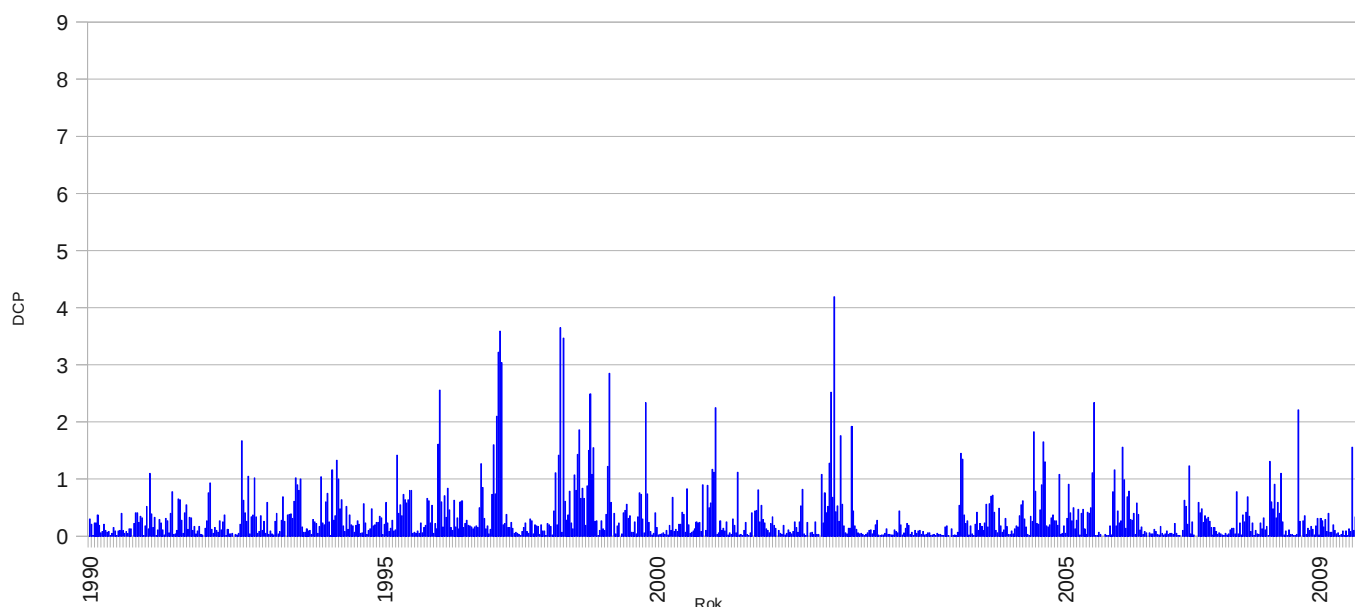
Derecho Composite Parameter (DCP)

Amerykańscy meteorolodzy używają specjalnego parametru, który ocenia ryzyko występowania zjawisk derecho. To tzw. *Derecho Composite Parameter* w skrócie DCP. Bierze on pod uwagę chwiejność termodynamiczną z najbardziej niestabilnego poziomu troposfery (MUCAPE), energię konwekcji prądów zstępujących (DCAPE), średni wiatr z dolnych 6 km (0-6 km mean wind) i uskok wiatru w warstwie 0-6 km (0-6 km shear). Przedstawia się on następująco:

$$DCP = (DCAPE/980) * (MUCAPE/2000) * (0-6 \text{ km shear}/20 \text{ kts}) * (0-6 \text{ km mean wind}/16 \text{ kts})$$

Uwzględnia on więc cztery ważne czynniki sprzyjające powstawaniu silnych konwekcyjnych podmuchów wiatru: niestabilność, siłę prądów zstępujących, uskoki wiatru i intensywność przepływu w troposferze. Wartość DCP równa 2 wskazuje na ryzyko wystąpienia tego typu zjawisk zakładając, że konwekcja zostanie zainicjowana (najlepiej w linii). W USA zjawiska WF derecho zdarzają się zwykle przy wartościach DCP rzędu 2-6 (Coniglio i inni, 2005). Podstawiając dane z Pragi otrzymujemy ekstremalną wartość DCP równą ponad 8. To być może absolutny rekord w naszej części Europy i wartość wysoka nawet w USA. Oto wartości DCP z Pragi z ostatnich 20 lat:

Derecho Composite Parameter Praga (1990-2009)



*Brane są pod uwagę pomiary z godzin 00, 06, 12 i 18 UTC, które były wykonywane w ciepłej porze roku (kwiecień-wrzesień) w warunkach sprzyjających głębokiej konwekcji: gdy MLCAPE (0-500 m) osiągnęło przynajmniej 300 J/kg.

Jak widać parametr DCP z 23 lipca 2009 (ostatnia najwyższa, niebieska kreska) wykracza poza wszelkie normy – to zdecydowanie najwyższa zanotowana wartość w ostatnich 20 latach. Tego dnia miało miejsce rzadko spotykane połączenie bardzo dogodnych warunków termodynamicznych i kinematycznych. Świadczy to o tym, jak duży „potencjał wiatrowy” miały burze, które się rozwinęły na pograniczu Polsko-Czesko-Niemieckim po 3 godzinach od wykonania radiosondażu.

Innym przykładem ekstremalnej wartości DCP (5,36) mogą być pomiary sondażowe wykonane 29.07.2005 o 12Z w Kuemmersbruck w Niemczech. Jak się okazało, sondaż zwiastował jedno z najsilniejszych nawałnic u naszych zachodnich sąsiadów od wielu lat. Gwałtowne burze z wyjątkowo silnymi podmuchami wiatru pojawiły się wieczorem i w nocy.

Dane z Pragi, a badania dotyczące derecho w USA

Na podstawie zgromadzonych danych radiosondażowych amerykańscy naukowcy (Evans, Doswell 2001) opracowali zestaw statystyk dotyczących rozmaitych wskaźników termodynamicznych i kinematycznych związanych ze zjawiskami derecho w USA (Evans, Doswell 2001). Oto tabela obrazująca wartości poszczególnych parametrów w odniesieniu do warunków z Pragi:

Parametr	Dolny próg	Górny próg	Wartość z Pragi
MUCAPE	1686	3947	3690
MLCAPE(0-1 km)	1097	2901	1798
DCAPE	817	1235	991
Średni wiatr w warstwie 0-6 km	10	20	15
uskok wiatru w warstwie 0-6 km	11	20	24
uskok wiatru w warstwie 0-3 km	8	15	19
uskok wiatru w warstwie 0-2 km	8	16	15

*Dane dotyczące wiatru podane są w m/s, czynniki termodynamiczne w J/kg. W tabeli są podane górne i dolne kwartyle parametrów dla zjawisk derecho w USA. Uwzględniono dla każdego parametru środkowe 50 % przypadków (odrzucone górne 25 % i dolne 25 % przypadków).

Jak widać, podstawione dane z Pragi mieszczą się w powyższych przedziałach, a część z nich jest nawet powyżej górnego kwartyla. Trudno jest porównywać statystyki zebrane w USA z przypadkiem derecho w Europie. Biorąc jednak pod uwagę, że na Starym Kontynencie dogodne warunki do silnych nawałnic zdarzają się rzadziej niż w USA, tym bardziej zwraca uwagę fakt zanotowania takich danych w naszym rejonie.

DCP, a nawałnice w Polsce

Analizując przypadki nawałnic z silnym wiatrem (niekoniecznie na skalę derecho), które się zdarzały w Polsce, można zauważyć duży związek występowania tych zjawisk z wysokimi wartościami DCP. Z pewnością parametr DCP przekraczający 1 wskazuje na zagrożenie nawałnic niosących silne podmuchy, a im większe wartości tym większe ryzyko. Układem sprzyjającym jest zazwyczaj napływ gorącej i chwiejnej masy PZm w niewielkiej odległości od strefy frontowej w obecności znacznych pionowych uskoków wiatru. Oto tabela ukazująca silne nawałnice w kraju w ostatnich 5 latach w zestawieniu z parametrem DCP notowanym na stacjach radiosondażowych w Polsce lub u naszych sąsiadów:

30 V 2005	Potężna nawałnica na południowym-zachodzie Polski	2,06 – Wrocław 12Z
29 VII 2005	Silne nawałnice w Polsce	1,9 – Wrocław 12Z 1,4 – Legionowo 12Z
30 VII 2005	Silne burze nad krajem	1,9 – Wrocław 00Z 1,34 – Legionowo 12Z
21 VI 2006	Gwałtowne burze nad Polską	1,49 – Wrocław 12Z
26 VI 2006	Nawałnice z wiatrem nad krajem	1,1 – Wrocław 12Z
11 V 2007	Gwałtowne nawałnice z silnym wiatrem w Polsce	2,96 – Prostejov 12Z 1,78 – Wrocław 12Z
20 VII 2007	Fala potężnych burz w środkowej Polsce	1,19 – Prostejov 12Z
21 VIII 2007	„Biały szkwał” na Mazurach	0,94 – Legionowo 00Z
23/24 VIII 2007	Gwałtowne burze z silnymi szkwałami w Polsce, Zwłaszcza w Małopolsce	3,21 – Budapeszt 23 VIII 12Z 2,89 – Wiedeń 23 VIII 12Z 1,01 – Prostejov 23 VIII 12Z 1,68 – Legionowo 24 VIII 00Z
13 VII 2008	Silne nawałnice w kraju	2,27 – Prostejov 12Z
15 VIII 2008	Potężne nawałnice i trąby powietrzne w dużej Części kraju	2,81 – Poprad 12Z 1,45 – Prostejov 12Z
16 VIII 2008	Silne nawałnice w środkowej i wschodniej Polsce	1,91 – Legionowo 12Z
18 VII 2009	Nawałnice z silnymi podmuchami w środkowej Polsce	1,25 – Legionowo 12Z 1,2 – Łeba 12Z
23 VII 2009	Derecho nad Polską, omawiany tutaj przypadek	8,39 – Praga 12Z 4,18 – Wrocław 12Z
03 IX 2009	Burze z wiatrem w Polsce	1,33 – Wrocław 12Z

W przypadku, gdy taka sytuacja występuje w porze nocnej (nocny radiosondaż), powinno być to szczególnie alarmujące. Wysokie wartości DCP zdarzają się w nocy o wiele rzadziej (ze względu na mniejsze CAPE), ale ich obecność często wiąże się z pojawieniem doskonałych okoliczności dla gwałtownych burz z silnym wiatrem. Oto tabela bazująca na radiosondażach z Wrocławia i Legionowa z godziny 00Z i ilustrująca najwyższe nocne wartości DCP w Polsce w latach 2001-2009:

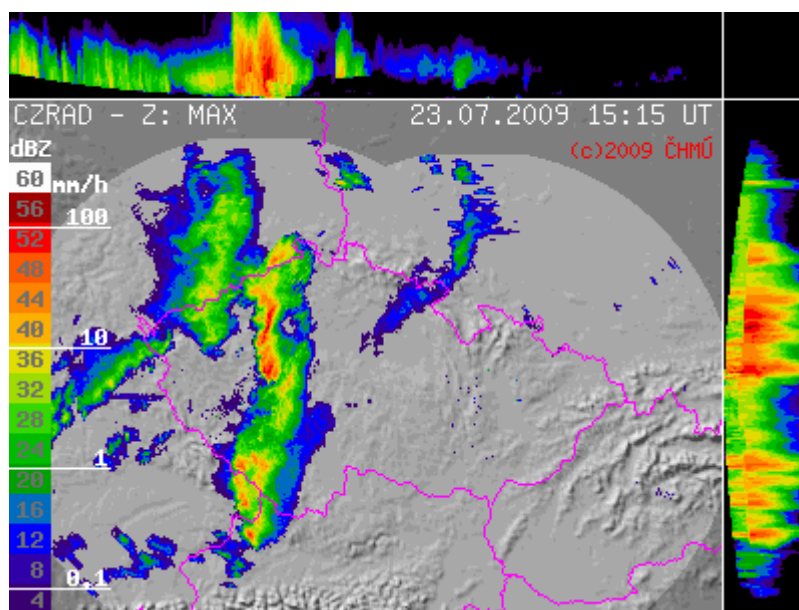
1,9	29/30 VII 2005	Wrocław	Tej nocy bardzo gwałtowne burze z wiatrem w Niemczech, 30.VII groźnie także w Polsce
1,68	23/24 VIII 2007	Legionowo	Tej nocy silne nawałnice w dużej części Kraju, zwłaszcza w Małopolsce
1,57	15/16 VII 2001	Legionowo	Następnego dnia bardzo silne burze z wiatrem w Polsce
1,51	03/04 VII 2002	Legionowo	Następnego dnia kataklizm w Puszczy Piskiej spowodowany potężną nawałnicą
1,23	10/11 VII 2002	Legionowo	Następnego dnia burze z silnym wiatrem w Polsce, Kilka godzin wcześniej derecho we wschodnich Niemczech
0,94	20/21 VIII 2007	Legionowo	Następnego dnia zdarzyła się tragedia na Mazurach zwana potocznie "białym szkwałem"

Jak widać każda taka sytuacja wiązała się z wystąpieniem znaczących zjawisk burzowych należących do najsilniejszych w naszym rejonie w ostatnich latach.

Omówienie rozwoju burzy z dnia 23.07.2009 i szkód przez nią spowodowanych

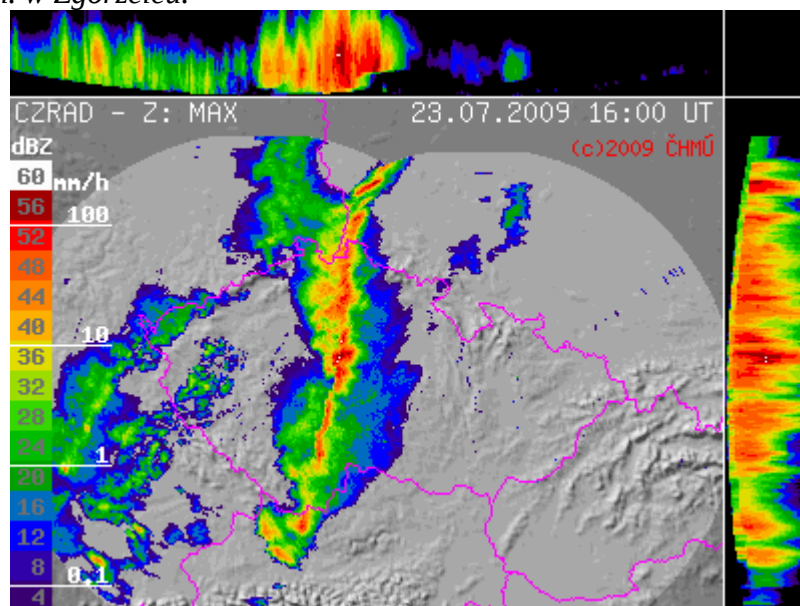
Układ burzowy klasyfikowany jako derecho i określany w mediach jako „Pogodowy Armageddon”, powstał późnym popołudniem. Do jego początków można zaliczyć proces tworzenia się komórek burzowych nad wschodnią Bawarią, który został zaobserwowany około godz. 15 – 16 CEST. Po godzinie 16:00 CEST na pograniczu czesko – niemieckim powstała klasyczna superkomórka burzowa, która przemieszczała się z zachodu na wschód. Burza ta dała groźne zjawiska w postaci gradu o średnicy do 4 cm oraz porywistego wiatru głównie po stronie niemieckiej. Po przejściu przez czeską granicę, zanikła. Podczas gdy superkomórka znad południowo – zachodnich Czech wyraźnie traciła na sile (ok. godz. 16:45 CEST), nad północno – zachodnią częścią tego kraju zaczęła się formować wyraźna linia burzowa, która przesuwała się z południowego zachodu na północny wschód.

Obrazek 2: Obraz maksymalnej odbiciowości radarowej opadów wygenerowany przez system czeskich radarów meteorologicznych CZRAD o godzinie 17:15 CEST (Źródło danych: Český hydrometeorologický ústav - CHMI, www.chmi.cz). Na obrazie widać wyraźny fragment tworzącej się linii szkwału w północno – zachodnich Czechach. Jednocześnie na południowym – zachodzie Czech widać pozostałości po burzy superkomórkowej.



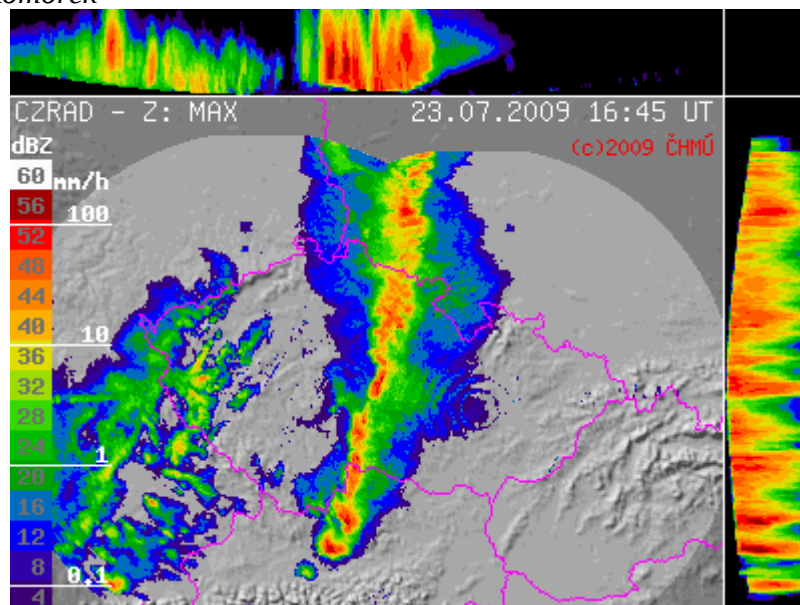
Linia ta bardzo szybko się rozrastała zarówno na północ, jak i na południe. Dość szybko pojawiła się bardzo dobrze zorganizowana burza wielokomórkowa w formie linii szkwałowej. Około godziny 18:00 CEST można było mówić już o układzie MCS z wyraźną linią szkwałową, która ciągnęła się od Ziemi Lubuskiej, przez Łużyce, całe Czechy, aż do północnej części Austrii. W niektórych miejscach w centralnej części Czech odbiciowość opadów przekraczała 60 dBZ, co może sugerować wystąpienie opadów gradu. Jednocześnie pojawiły się pierwsze obserwacje szeroko rozprzestrzenionych, bardzo silnych porywów wiatru w wielu miejscach przekraczającego 26 m/s. Taki wiatr pojawił się m.in. w Zgorzelcu, w czeskiej Pradze i w jej okolicach. Bardzo wiele raportów o zniszczeniach powstałych na skutek działania wiatru zanotowano w Środkowoczeskim Kraju (centralna część Republiki Czeskiej). Wichura wyrывała drzewa z korzeniami i kładła je na zabudowania, łamała też słupy wysokiego napięcia.

Obrazek 3: Obraz maksymalnej odbiciowości radarowej opadów wygenerowany przez system CZRAD z godziny 18:00 CEST (Źródło: Český hydrometeorologický ústav – CHMI, www.chmi.cz). Przez Czechy przebiega wyraźna linia szkwału, wzdłuż której notuje się opady gradu, a przede wszystkim potężne porywy wiatru przekraczające prędkość 30 m/s. Linia szkwału wyraźnie się rozbudowuje, przemieszcza się na północny wschód i wkracza także na teren Polski, przynosząc silne szkwały m.in. w Zgorzelcu.



W kolejnych kilkudziesięciu minutach rozwoju układu burzowego mocno zintensyfikowała się jego północna część, gdzie wystąpiły najgroźniejsze zjawiska. Około godziny 18:15 CEST radar meteorologiczny na obrazie odbiciowości opadów uchwycił w rejonie Lubania i Lwówka Śląskiego rozwój burzy superkomórkowej (na obrazach z 18:15, 18:30 i 18:45 CEST widać echa radarowe typowe dla rotacji w powstałym segmencie linii szkwału). Później burza superkomórkowa zamienia się w *bow echo*. Po godzinie 18:30 CEST inna część linii szkwałowej dotarła też do Jeleniej Góry, następnie przeszła przez Kamienną Górę, Jawor i skierowała się na Legnicę. Notowano tam bardzo silne wiatry, które łamały drzewa i zrywały linie energetyczne. Jednocześnie południowa część układu MCS zaczęła powoli słabnąć.

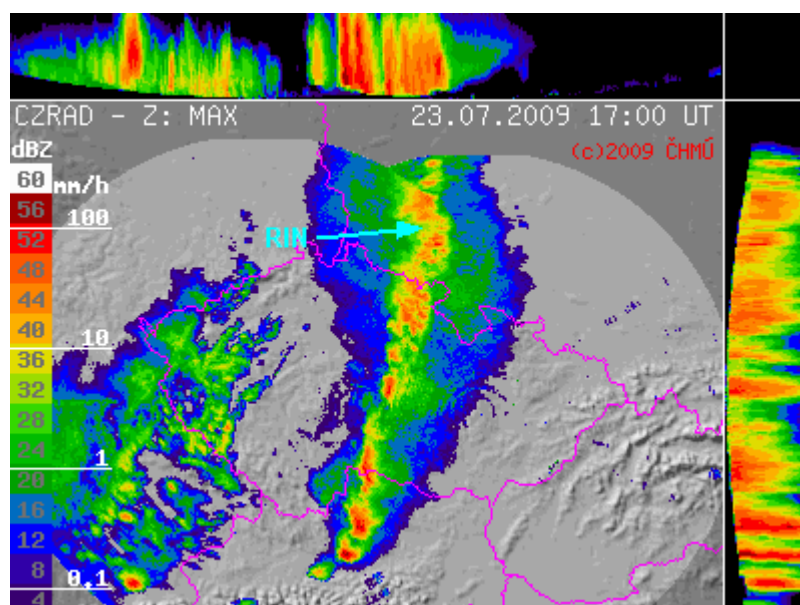
Obrazek 4: Obraz maksymalnej odbiciowości radarowej opadów wygenerowany przez system CZRAD z godziny 18:45 CEST (Źródło: Český hydrometeorologický ústav – CHMI, www.chmi.cz). W Polsce południowo – zachodniej pojawia się struktura świadcząca o istnieniu burzy superkomórkowej. W ciągu kolejnej godziny struktura ta zamieni się w wyraźną „główkę” bow echo. W ciągu tej godziny burza przynosi najsilniejsze zjawiska. Podobna burza znajduje się także na terenie północno – wschodniej Austrii, na południowym obrzeżu układu MCS, co jest typową lokalizacją superkomórek



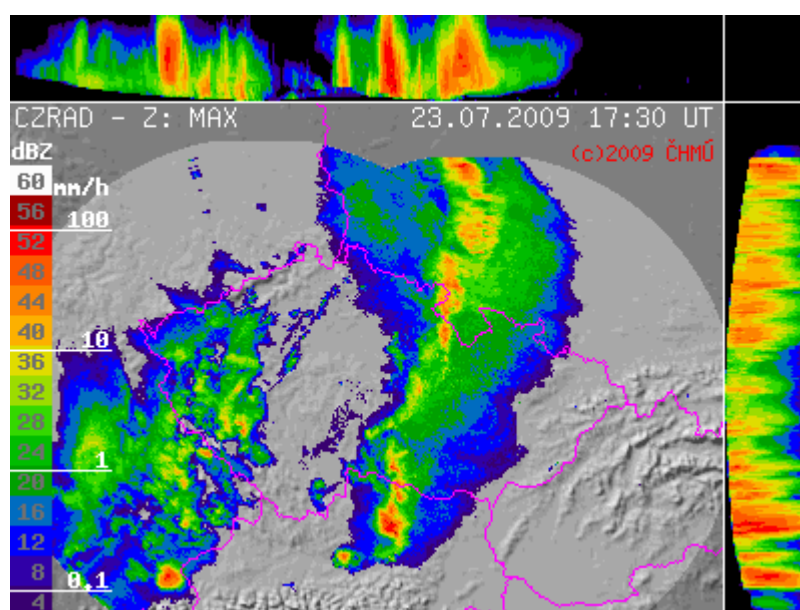
O godzinie 19:00 CEST, w chwili, gdy niszczycielski fragment burzy przechodził przez Legnicę, na czeskim radarze pojawia się charakterystyczna sygnatura dla *rear inflow jet* (w skrócie RIJ) świadcząca o bardzo silnym prądzie zstępującym w tej części burzy. RIJ spowodował wypychanie strefy opadów znacząco na przód w stosunku do linii szkwału, do tego ich odbiciowość stała się mniejsza. W pewnym momencie można wręcz mówić o „wyrwie” w linii silnych opadów, która oddzielała „główkę” powstającego bow echo od reszty linii szkwału. Prawdopodobnie w tym momencie wystąpiły najsilniejsze poddmuchy niszczącego wiatru osiągającego prędkość co najmniej 36 m/s (tyle zarejestrowała stacja meteorologiczna w Legnicy).

Obrazek 5: Obraz maksymalnej odbiciowości radarowej opadów wygenerowany przez system CZRAD z godziny 19:00 CEST (Źródło: Český hydrometeorologický ústav – CHMI, www.chmi.cz). Na obrazie w południowo – zachodniej Polsce, w okolicach Legnicy, pojawia się wyraźne wcięcie w linii szkwału, określane jako sygnatura RIN (*Rear Inflow Notch*). Jest ona związana z istnieniem silnego prądu powietrznego (*Rear Inflow Jet*), który nadaje przyspieszenie części linii szkwału i inicjuje rozwój zjawiska bow echo. Podczas tego zjawiska dochodzi do pojawienia się wyjątkowo silnych porywów wiatru. W niektórych miejscach w okolicach Legnicy lasy punktowo zostały zniszczone w 100% (wszystkie drzewa zostały wyrwane z korzeniami bądź połamane). W takich miejscach prąd zstępujący był wyjątkowo silny i manifestował swoją obecność poprzez kilka wyjątkowo silnych zjawisk microburst.

UWAGA: z powodu obecności Sudetów oraz opadów o dużej odbiciowości przy radarze we wschodniej części Czech, system CZRAD zaniżył odbiciowość opadów w Polsce południowo – zachodniej. Problem ten dotyczy także kolejnych obrazów radarowych z systemu CZRAD pojawiających się w tym rozdziale.



Obrazek 6: Obraz maksymalnej odbiciowości radarowej opadów wygenerowany przez system CZRAD z godziny 19:30 UTC (Źródło: Český hydrometeorologický ústav – CHMI, www.chmi.cz). Widać wyraźną „główkę” zjawiska bow echo nad Polską. Z powodu zaniżonej odbiciowości opadów, pozostała część linii szkwału znajdującej się nad Polską jest trudno dostrzegalna. W Czechach linia szkwału zaczyna zanikać, natomiast w Polsce staje się silniejsza i bardziej rozległa, organizuje się w typowy układ bow echo (BEC). Ze względu na problem z udostępnianiem danych radarowych z Polski przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (dane są płatne), nie możemy tych danych zaprezentować w tym opracowaniu.



W Legnicy nawałnica niemal doszczętnie zniszczyła miejscowy park, zostały połamane nawet pozornie odporne na łamanie się dęby i inne „mocne” drzewa. Słabsze gatunki drzew (np. topole) uległy zniszczeniu w takim stopniu, że w większości przypadków nadawały się tylko do całkowitego wycięcia. O wyjątkowej sile wiatru mogą świadczyć też szkody w zabudowaniach. Tylko w samej Legnicy uszkodzeniom uległo ponad 300 budynków, kilkanaście dachów zostało niemal zupełnie zerwanych. Ponad 600 budynków różnego typu zostało uszkodzonych w innych rejonach powiatu legnickiego, szczególnie duże szkody odnotowano w gminie Kunowice. Szkody w lasach w okolicach Legnicy świadczą o sile wiatru F1/T3 (przypuszczalna prędkość wiatru osiągała więc wartość ponad 42 m/s). Ważną cechą zniszczeń wiatrowych jest szerokie rozprzestrzenienie szkód, w pasie o znacznej szerokości. Ciekawe jest to, że najpoważniejsze szkody w lasach wystąpiły raczej punktowo, ukazując miejsca, które zostały najbardziej dotknięte przez silny prąd zstępujący tej burzy. Kilkadziesiąt minut po przejściu nawałnicy przez Legnicę w mediach pojawiły się pierwsze informacje na temat burzy. Burza od razu została nazwana „pogodowym armageddonem”. W ciągu kilkudziesięciu minut od przejścia burzy nad Legnicą, nawałnica powoduje straty w pozostałych miejscach województwa dolnośląskiego. Praktycznie nie ma powiatu, w którym z powodu nawałnicy nie było szkód. Szczególnie mocno nawałnica zaatakowała okolice Świdnicy i Wałbrzycha. Był to drugi obszar w woj. dolnośląskim, w którym zanotowano bardzo duże zniszczenia, aczkolwiek mniejsze, niż w okolicach Legnicy, Prochowic i Wołowa. Najmniejsze szkody zanotowano w południowo – wschodniej i północno – zachodniej części województwa.

Obrazek 7: Zniszczenia w Parku Miejskim w Legnicy, fotografia wykonana ok. tydzień po przejściu nawałnicy; stare, potężne drzewa wyrwane z korzeniami, oceniania siła wiatru – F1 w skali Fujity, T3 w skali Torro (fot. Marcin Kubiś).



Obrazek 8: Inny fragment Parku Miejskiego w Legnicy, szkody typowe dla kategorii F1 / T3. Część drzew została ogołocona przez wiatr w konarów i większych gałęzi (fot. Marcin Kubiś).



Obrazek 9: Wiatr miejscami łamał zdecydowaną część drzew. Drzewa, które ocalały, są poważnie uszkodzone (fot. Marcin Kubiś).



Obrazek 10: Zniszczenia w lesie liściastym należącym do Nadleśnictwa Wołów. Widać charakterystyczne ułożenie drzew, które świadczy o wystąpieniu zjawiska microburst. Szkody wskazują na siłę wiatru kategorii F1/T3(Źródło: Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych we Wrocławiu, fot. Wojciech Mazur).



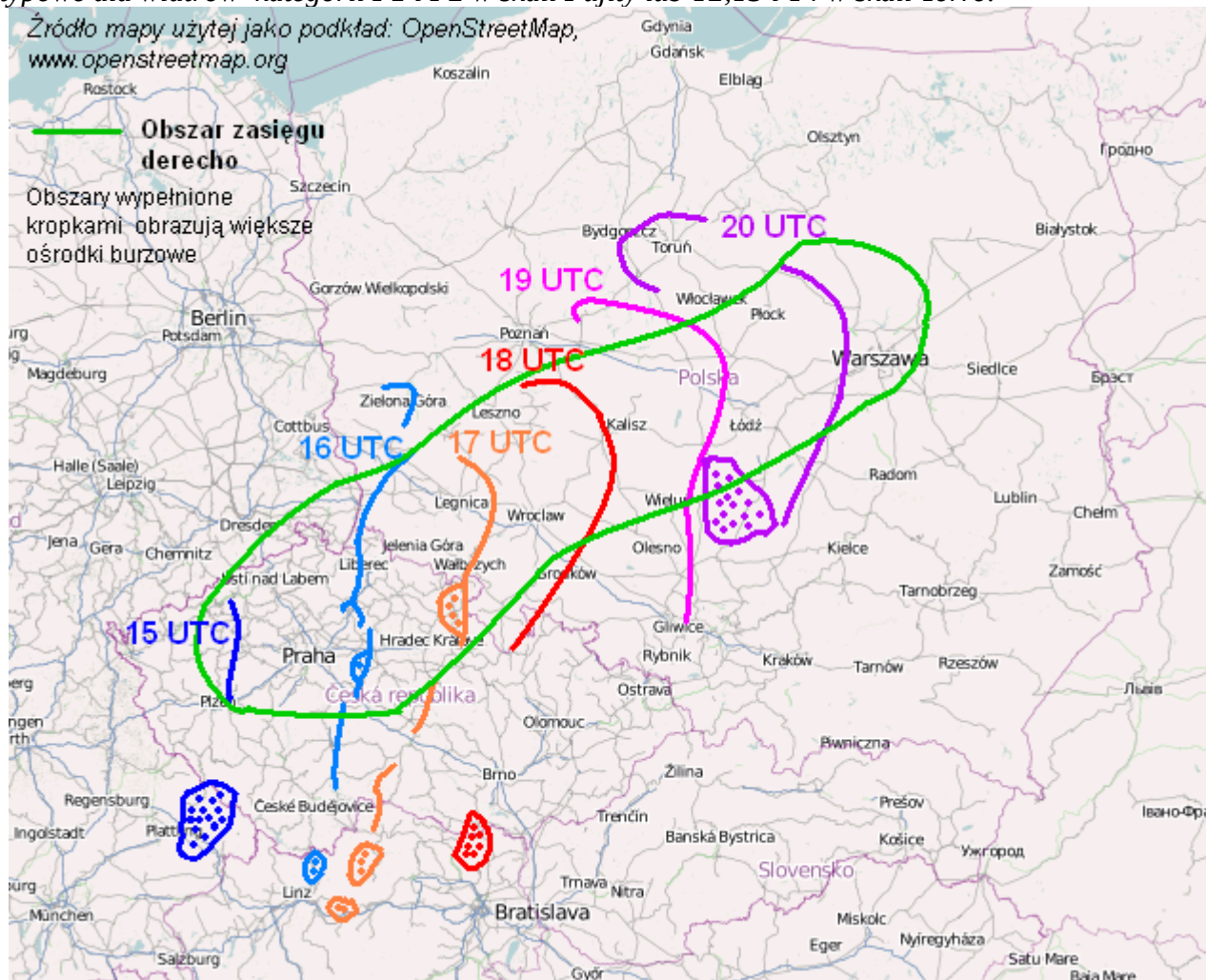
Obrazek 11: Szeroko rozprzestrzenione szkody w lesie sosnowym Nadleśnictwa Legnica, na fotografii ok. 50% drzew stanowią wywroty i wiatrołomy (źródło: Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych we Wrocławiu, fot. Wojciech Mazur).



Warto wspomnieć o tym, że po przejściu przez rejon Legnicy północna część burzy, czyli „główka” *bow echo* oraz fragment linii szkwału zaczęła się przemieszczać szybciej od pozostałych części burzy. Przyspieszenie to jest charakterystycznym elementem w gwałtownych zjawiskach *bow echo* i powstaje również na skutek oddziaływania silnych prądów zstępujących pojawiających się w przedniej części układu burzowego.

Około godziny 19:20 burza dotarła do Wrocławia, gdzie zanotowano porywy wiatru do 25 m/s. Miasto w części zostało na kilka godzin pozbawione energii elektrycznej. W pewnych dzielnicach miasta notuje się większe szkody niż w pozostałych, co wskazuje na lokalne zjawiska *microburst*. Najbardziej niszcząca część burzy przeszła zdecydowanie na północ od Wrocławia, przybierając na obrazach radarowych odbiciowości opadów strukturę typową dla *bow echo* (rys. powyżej). Początkowo wyglądało na to, że na linii szkwału formowało się kilka zjawisk *bow echo*, jednak kilkadziesiąt minut później powstało jedno rozległe, wyraźne *bow echo*, typowe dla zjawiska *derecho* typu progresywnego. Mimo przeorganizowania się burzy, bardzo silne, niszczące wiatry dalej występowały. Przeszły m.in. nad okolicami Rawicza, Gostynia, Leszna i Krotoszyna na południu woj. wielkopolskiego, gdzie ponownie zarejestrowano szkody charakterystyczne dla kategorii F1 / T3, szczególnie na obszarach zalesionych. W jednym przypadku stwierdzono siłę wiatru osiągającą kategorię F2 / T4 - T5 (okolice Borka Wielkopolskiego). W wyniku tak potężnego wiatru całkowitemu zniszczeniu uległa ceglana stodoła, wiatr wyburzył jej ściany. Nie wszystkie szkody w okolicach Borka Wielkopolskiego są typowe dla wiatru prostoliniowego, dlatego nie wyklucza się w tym miejscu pojawienia się krótkotrwałej trąby powietrznej.

Obrazek 12: Rozwój zjawiska *derecho* w dniu 23.07.2009 nad Czechami, Polską i Niemcami. Kolorowe linie oznaczają lokalizację i przemieszczanie linii szkwałowej oraz bow echo. Obszary wypełnione kropkami oznaczają większe ośrodki burzowe wchodzące w skład MCS z linią szkwałową. Obszar wytyczony zielonym zaznaczeniem przedstawia zasięg zjawiska *derecho*. Na zaznaczonym obszarze notowano porywy wiatru przekraczające 26 m/s, a w kilku miejscach 33 m/s. Odnotowano też liczne szkody typowe dla wiatrów kategorii F0/T1, a w kilkunastu miejscach typowe dla wiatrów kategorii F1 i F2 w skali Fujity lub T2, T3 i T4 w skali Torro.

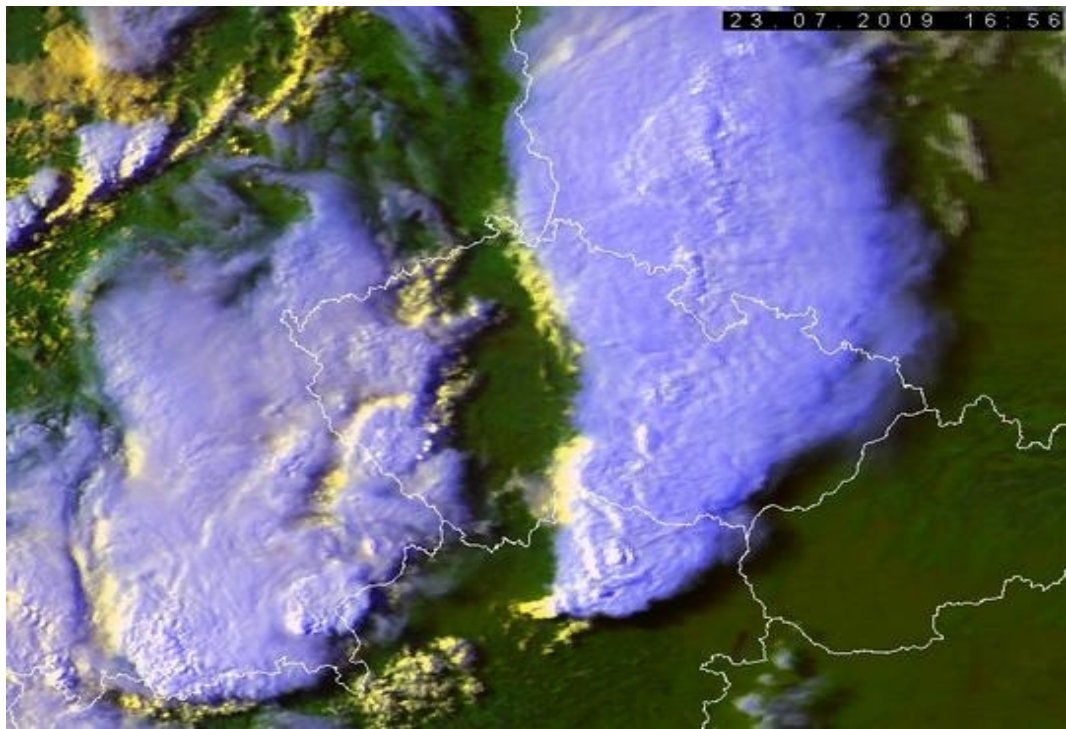


Po godzinie 20:00 CEST na obrazach radarowych pojawiła się dojrzała, w pełni rozwinięta faza *bow echo*, powoli przechodząca w *comma echo*, składającą się z wyraźnego łuku w północnej części układu oraz rozbudowującą się w kierunku południowym linią szkwałową, wyraźnie powiązaną z łukiem, jednak wolniej się przemieszczającą. Strukturę tę można określić jako BEC – *Bow Echo Complex* (Klimowski i inni, 2004). Opisano też kilka przykładów układu BEC (np. Przybylinski i DeCaire, 1985) jako struktur odpowiedzialnych za zjawisko *derecho*. Po godzinie 20:00 CEST siła *bow echo* nieco osłabła, zmniejszyła się jego odbiciowość na obrazie radarowym, nieznacznie spadła prędkość wiatrów, mimo wszystko dalej układ miał znaczną siłę. Na wschodzie woj. wielkopolskiego, zachodzie mazowieckiego i na przeważającej części woj. łódzkiego notowano szkody charakterystyczne dla kategorii F1 / T2 lub niższych. Tylko w pojedynczych przypadkach szkody mogą sugerować kategorię F1 / T3 (zniszczona duża ilość drzew oraz uszkodzone lub częściowo zerwane dachy na zabudowaniach różnego typu). Największe szkody występowały na niewielkich obszarach, sugerując lokalne uderzenia najsilniejszych porywów wiatru pochodzące ze zjawisk *microburst* (zjawisko *downburst* o niewielkim, punktowym zasięgu,

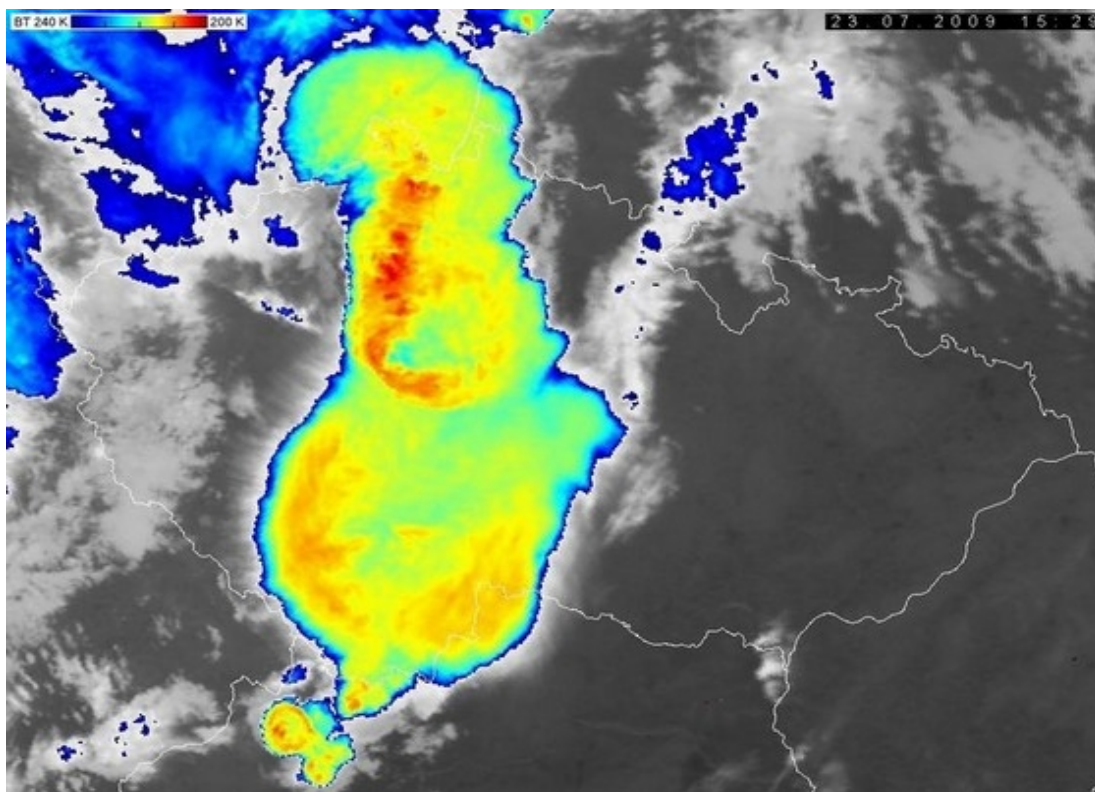
do 4 km² powierzchni). Mimo spadku intensywności zjawiska, notowano coraz więcej wyładowań doziemnych w burzy. To zaś potwierdza fakt, że największa liczba wyładowań doziemnych wcale nie musi być generowana podczas najbardziej intensywniej fazy zjawiska konwekcyjnego. W przypadku omawianego przypadku znacznie więcej odnotowano wyładowań międzychmurowych (cc), niż doziemnych (cg). Duża ilość wyładowań cc potwierdza fakt, że chmura związana z derecho wypiętrzyła się na bardzo duże wysokości (jej wierzchołki w różnych fazach rozwoju osiągały temperatury poniżej – 60 st.C).

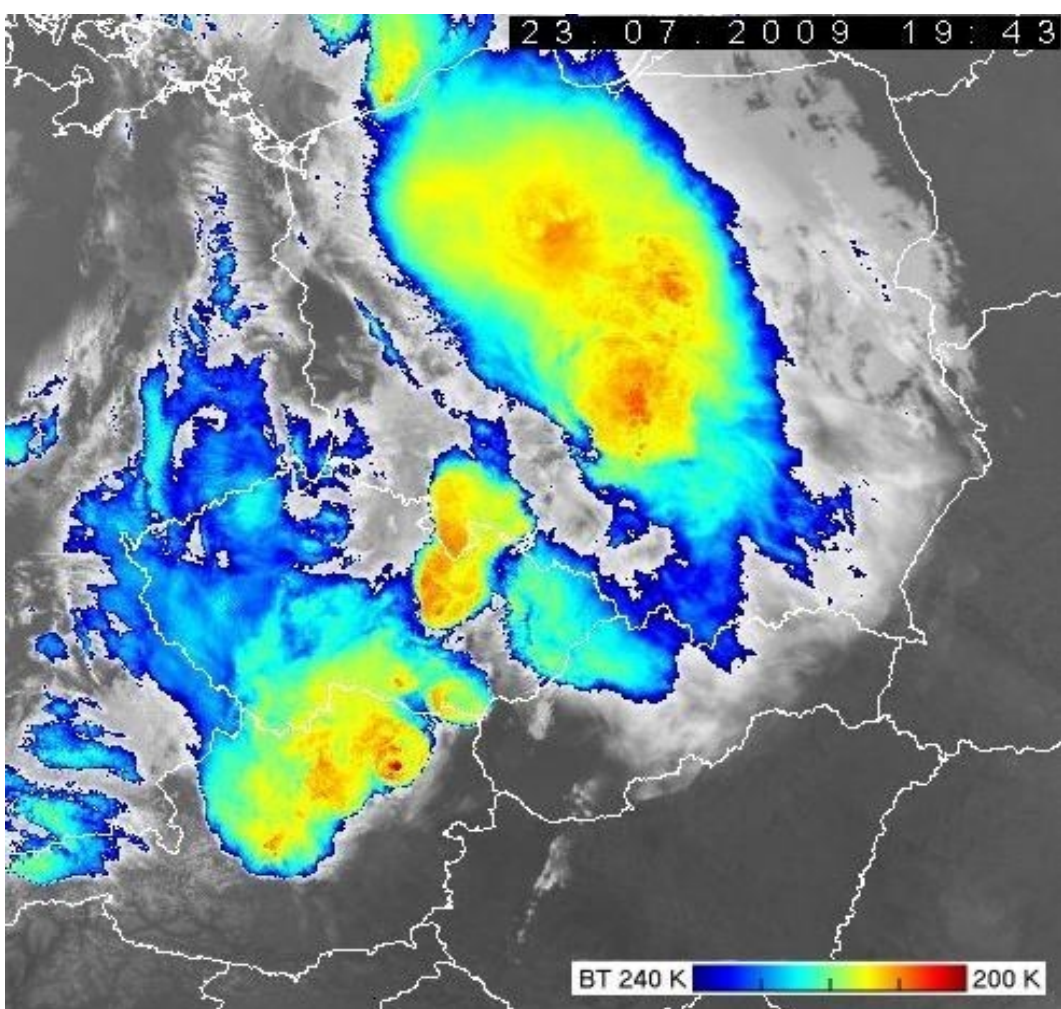
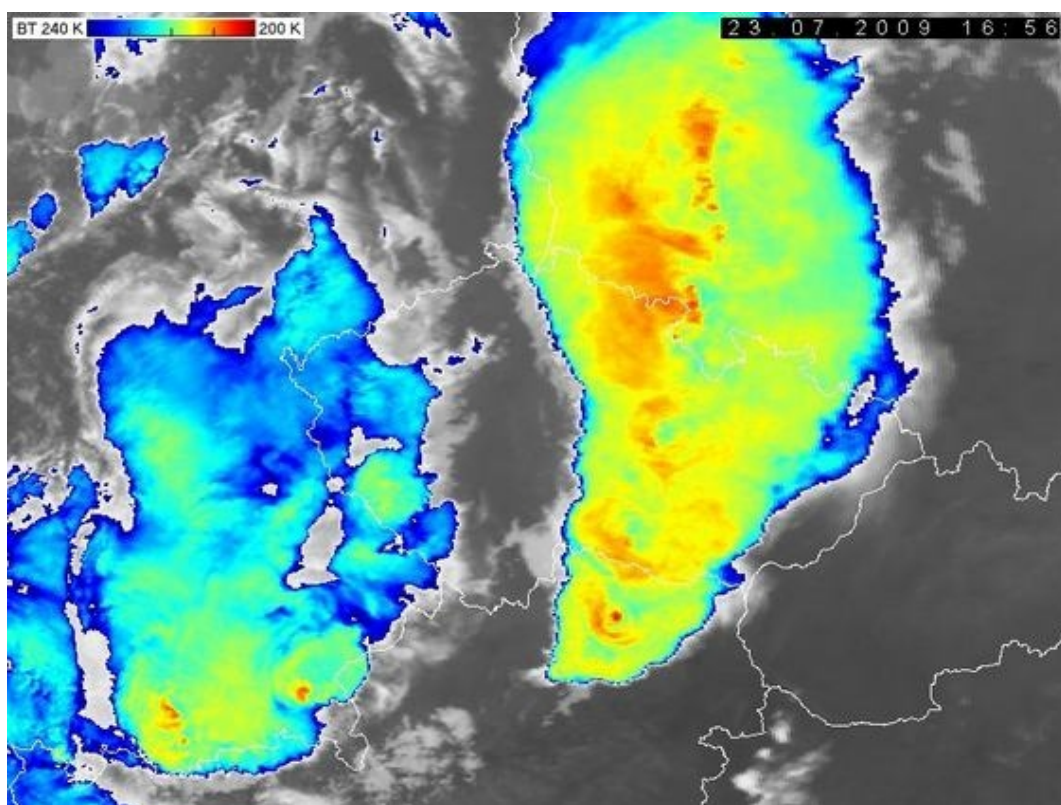
Obrazki 13 i 14: Na zdjęciach satelitarnych (Źródło: Český hydrometeorologický ústav – CHMI, www.chmi.cz i NOAA, www.noaa.gov) wykonanych w świetle widzialnym (VIS) widzimy rozwój układu MCS. Pierwsze zdjęcie wykonał satelita polarny NOAA-15 o godz. 17:29 CEST, następne zdjęcie zostało wykonane przez satelitę polarnego NOAA-16 o godzinie 18:56 CEST. Uwagę na pierwszym zdjęciu zwraca fakt, że w tworzącej się burzy wielokomórkowej widać wyraźne dwa segmenty. Układ burzowy czasami potrafi zawierać w sobie kilkanaście takich segmentów. Jest to typowe dla pierwszej fazy rozwoju MCS, gdyż taki układ powstaje zwykle z kilku pojedynczych komórek burzowych w oddziaływaniu jednej strefy konwergencji wiatru w dolnej części troposfery. Na drugim zdjęciu segmenty układu MCS zanikają, natomiast w północnej i południowej części chmury burzowej znajdują się charakterystyczne silne wypiętrzenia, tzw. overshooting tops, świadczące o występowaniu gwałtownych prądów wstępujących. W przypadku południowego krańca układu MCS, overshooting top towarzyszy superkomórce, co jest cechą charakterystyczną tego typu burzy. W przypadku północnej części MCS, wypiętrzenia znajdują się w okolicy Legnicy, gdzie układ przybiera szczególnie gwałtowną postać i pojawia się zjawisko bow echo. Za układem konwekcyjnym, który znajduje się nad Polską i Czechami widać następny, podobny układ, z tym, że nie powstaje w nim linia szkwału, a jedynie klaster burz. Miejscami tworzą się tam superkomórki burzowe i dają opady dużego gradu.



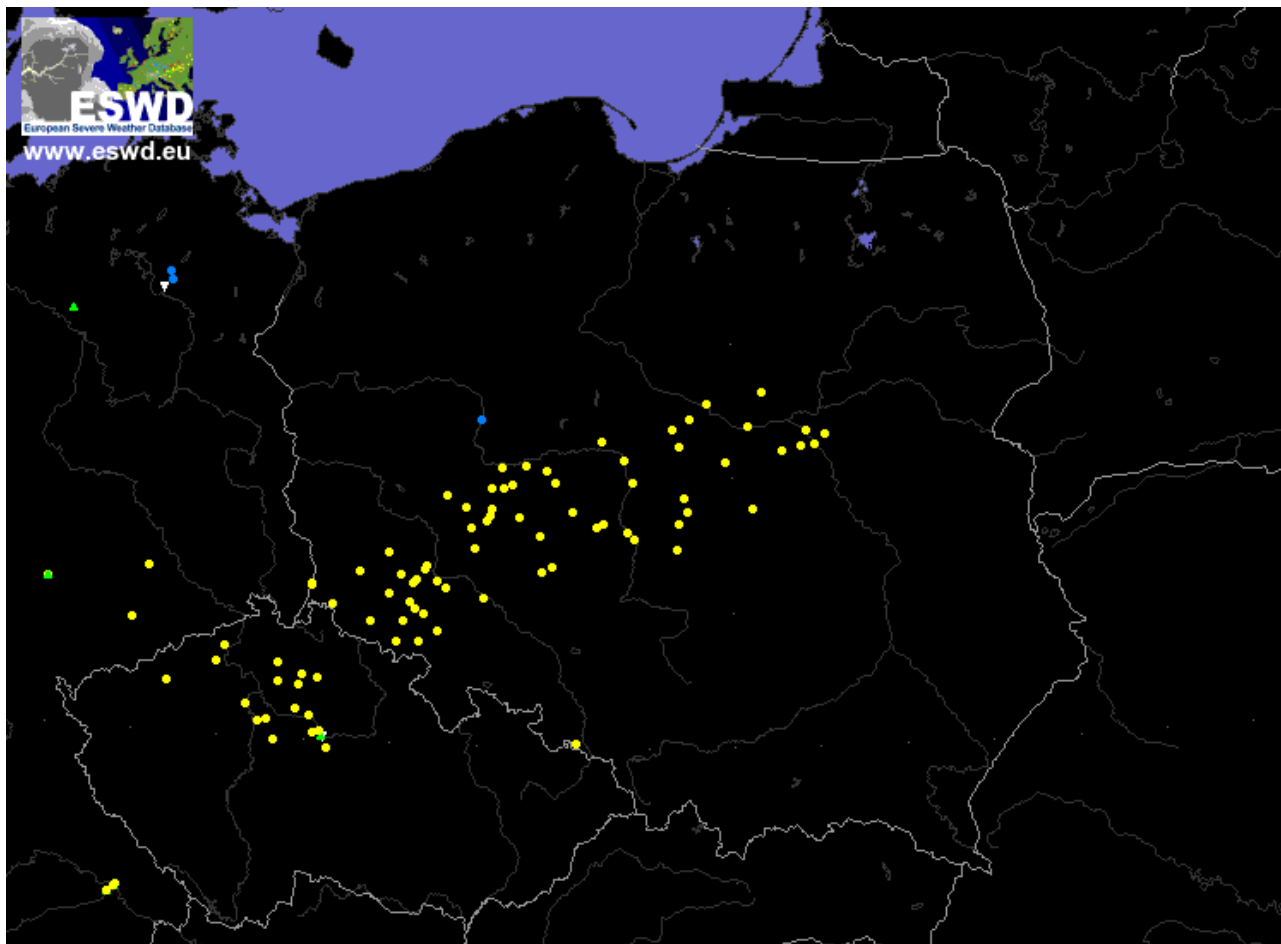


Obrazki 15, 16 i 17: Zdjęcia satelitarne (Źródło: Český hydrometeorologický ústav – CHMI, www.chmi.cz i NOAA, www.noaa.gov) wykonane w podczerwieni (IR). Pierwsze i drugie zdjęcie Zostało wykonane w tym samym czasie i przez te same satelity, co poprzednie dwa zdjęcia w świetle widzialnym. Trzecie zdjęcie wykonał kolejny satelita polarny NOAA-17 o godzinie 21:43 CEST, gdy MCS niemal w całości znajdował się nad Polską. Tryb wykonania poniższych zdjęć pozwala określić temperaturę wierzchołków chmur. Im bardziej czerwony jest kolor chmur, tym niższa jest ich temperatura (niebieski – temp. ~ -35 st.C, mocno czerwony – temp. ~ -70 st.C). W przypadku overshooting tops temperatura spada nawet poniżej -60 st.C. Overshooting tops wyraźnie się odznaczają od reszty chmur swoją znacznie niższą temperaturą. W wielu przypadkach overshooting tops pozwalają zlokalizować najgroźniejszy typ burz - burze superkomórkowe.





Obrazek 18: Rozkład raportów z dnia 23.07.2009 z Polski w Europejskiej Bazie Danych o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych ESWD (www.eswd.eu). Żółte kropki – silne porywy wiatru (co najmniej 25 m/s lub poważne szkody od wiatru), niebieskie kropki – ulewne opady deszczu, zielone trójkąty – opady dużego gradu (średnica gradzin lub pokrywa gradowa osiągająca co najmniej 2 cm), czerwone trójkąty – trąby powietrzne, białe trójkąty – leje kondensacyjne.



Między godziną 22:00, a 23:00 CEST derecho zaczęło słabnąć, silne wiatry związane z frontem szkwałowym burzy dotarły do Warszawy i jej okolic, powodując liczne szkody w energetyce. W wielu miejscach wiatr był jeszcze na tyle silny, że łamał słabsze drzewa. W wyniku uszkodzeń w sieciach energetycznych, kilka godzin po burzy zakłady energetyczne ogłosiły stan „masowych awarii”. Zjawisko derecho ostatecznie skończyło się kilkadziesiąt km na północny wschód od Warszawy, ale front szkwałowym burzy dalej trwał i przemieszczał się na wschód. Jako zjawisko *outflow boundary* (postępująca granica oddziaływania prądu zstępującego burzy poza obręb macierzystego układu burzowego, charakterystyczna dla zanikania dużych układów burzowych) po północy dotarł do rejonu Białegostoku, przynosząc wzrost prędkości wiatru do ok. 60 km/h.

Możliwość przewidzenia zjawiska

Już kilka dni przed wystąpieniem zjawiska prognozy modeli wskazywały, że w Europie środkowej pojawi się wyraźna strefa frontowa cechująca się bardzo dużym poziomym kontrastem termicznym. Wiadomo było, że w jej pobliżu mogą rozwijać się gwałtowne burze w warunkach znacznej niestabilności, silnego przepływu i dużych pionowych uskoków wiatru. Dokładna prognoza gwałtownych zjawisk atmosferycznych na dzień 23.07.2009 była jednak utrudniona. Główną przyczyną była całkiem niska wilgotność względna w dolnej troposferze oraz warstwa hamująca konwekcję (CIN) na terenie Polski i w Czechach, która mogła zablokować rozwój zjawisk burzowych. Powyższe elementy występują dość często w gorącej i chwiejnej masie powietrza. Drugim problemem było rozmieszczenie krótkich fal górnych, które były wykazywane przez modele.

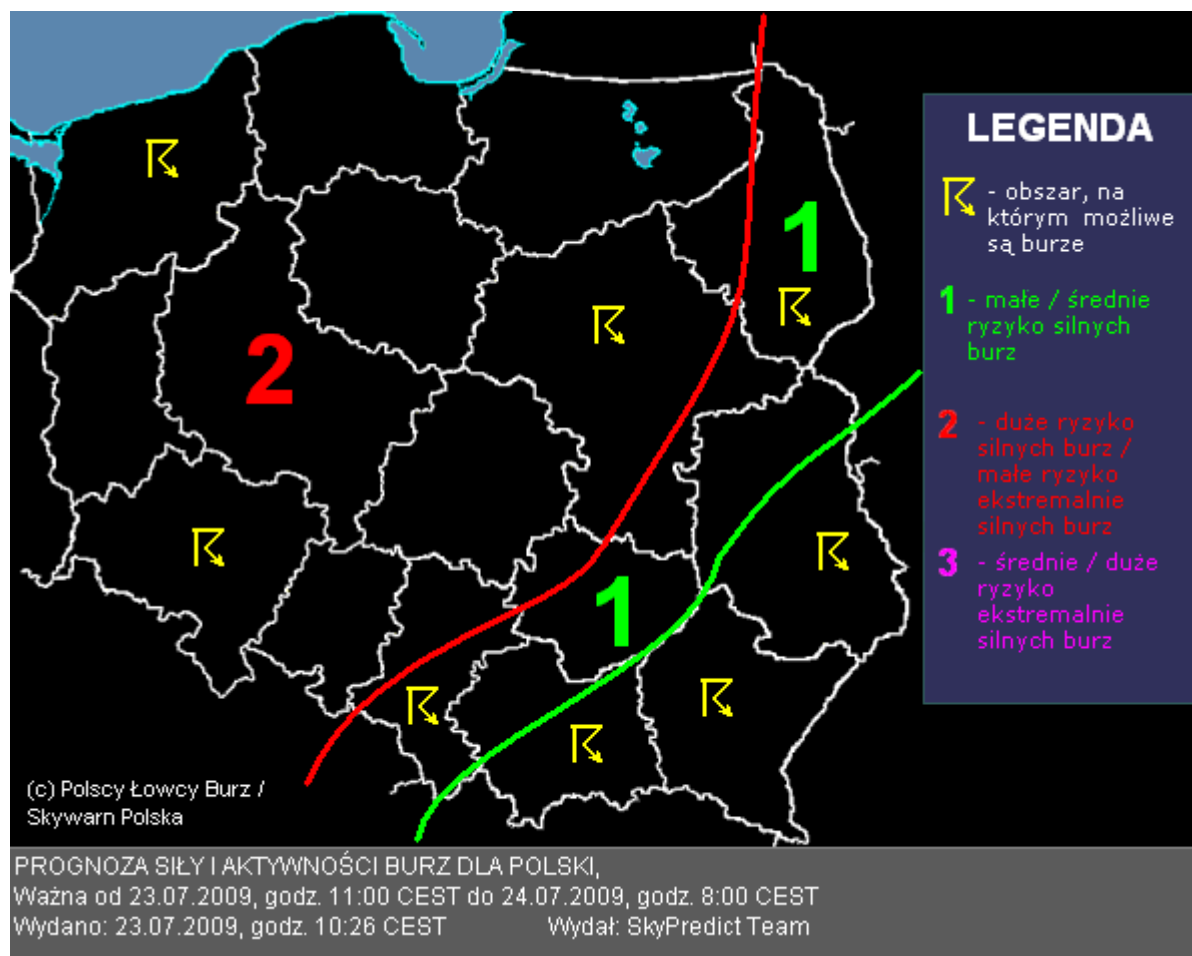
Dość dobrze rozmieszczenie krótkich fal z ogólnie dostępnych modeli pokazuje model GFS. Dodatkowo z modelu można uzyskać dane dotyczące prognozowanych wartości konwergencji przyziemnej oraz dodatniej / ujemnej adwekcji wirowości. Dodatnia adwekcja wirowości (PVA) jest zwykle związana z dywergencją wiatrów. Dla zjawisk burzowych istotna jest dywergencja (rozbieżność wiatru) w środkowych i górnych warstwach troposfery, podczas gdy w dolnej troposferze rozwojowi burz sprzyja konwergencja (zbieżność wiatru). Połączona konwergencja w dolnej warstwie troposfery oraz dywergencja w wyższych warstwach troposfery określana jest jako wspomaganie QG (ang. *QG forcing*) i jest najważniejszym mechanizmem wspomagającym ruchy pionowe i rozwój burz. Modele GFS już na 66 godzin przed wydarzeniem wskazywały silne wspomaganie QG w zachodniej połowie Polski. Dane były jednak bardziej dramatyczne, gdyż wskazywały wyjątkowo silne uskoki pionowe wiatru, szczególnie uskoki kierunkowe (wartości SRH 0-3km miały ekstremalne wartości), ponadto wykazywały większą wilgotność względną w dolnej troposferze. Przy MLCAPe (0-1 km) o wartościach 800 – 1500 J/kg, prognoza stanowiła bardzo poważny sygnał ostrzegawczy. Przy większej wilgotności można było oczekiwać podobnych zjawisk do tych, które wystąpiły w dniu 15 sierpnia 2008, w tym licznych i silnych trąb powietrznych. Mimo wszystko pewne ograniczenie zagrożenia istniało w postaci energii hamowania konwencji CIN osiagającej miejscami bardzo duże wartości. Od południa miały napływać gorętsze i względnie suchsze masy powietrza, a to zaś, zakładając rozwój burz wielokomórkowych, mogło spowodować wystąpienie ekstremalnie silnych porywów wiatru (prognozowana wartość energii prądów zstępujących DCAPE osiagała 1000 - 1500 J/kg). Dodatkowo spodziewany był bardzo duży gradient pionowy temperatur (o wartości ponad 9 stopni na kilometr w warstwie 2-4 km nad ziemią), co również przemawiało za silnymi podmuchami konwekcyjnymi.

Prognoza z wyprzedzeniem na 50 – 59 godzin wprowadziła jednak zmiany. Przede wszystkim rozdzieliła trochę strefę zbieżności wiatru od strefy PVA, gdyż krótka fala środkowotroposferyczna wg tej prognozy miała przyspieszyć i już pod wieczór dotrzeć do Pomorza Środkowego i Wschodniego. Dalej była prognozowana chwiejność MLCAPe (0-1 km) na poziomie 800 - 1500 J/kg, choć wg tej prognozy strefa ta przesunęła się nieco bardziej na południe. Dalej prognozowane były bardzo silne uskoki pionowe wiatru, zwłaszcza w dolnej troposferze. W rejonie maksimum wirowości spowodowanym przez krótką falę LLS (uskoki prędkościowe wiatru w warstwie 0 – 1 km AGL) punktowo wynosił 25 m/s, a SRH 0-3km przekraczało 500 m²/s². DLS (prędkościowe pionowe uskoki wiatru w warstwie 0-6 km nad gruntem) w tym samym regionie wg prognozy miało mieć podobną wartość do LLS, a nawet troszkę większą – nawet przy niedużej chwiejności i LCL na poziomie 800 – 1250m, jakie tam była prognozowane, mogły pojawić się burze superkomórkowe z gwałtownymi tornadami. Bardziej na południe (w gorącej masie powietrza)

dalej była prognozowana znaczna wartość DCAPE, która wciąż wskazywała na bardzo silne porywy wiatru. Również przewidywana wartość *delta theta-e* była bardzo duża jak na Polskie warunki - prognoza GFS wykazywała ją na poziomie 20 K. Chwiejność (MLCAPE) prognozowana była na poziomie 1000-1250 J/kg. Interesująco wyglądała prognoza dla 0-3 km MLCAPE – okazało się, że model prognozuje dość niewielką chwiejność dostępną dla prądów wstępujących w tej warstwie. Niska dzienna wartość 0 – 3 km MLCAPE ograniczała wprawdzie ryzyko wystąpienia trąb powietrznych, ale wraz z wysokim poziomem kondensacji (LCL ponad 2000 m) świadczyła o niedoborze wilgoci w dolnej troposferze, co w przypadku uformowania się burz zwiększa szansę silnych wiatrów szkwałowych. Dodatkowo, dalej utrzymywał się bardzo duży prognozowany gradient pionowy temperatur w środkowych warstwach troposfery. Sumując – model dalej sugerował burze wielokomórkowe, ale też pokazywał mniej wilgoci w troposferze. Jedynie na północnym zachodzie Polski utrzymywała się większa wilgotność względna, choć przy mniejszym CAPE. Biorąc jednak pod uwagę znakomite warunki kinematyczne prognozowane w tej części Polski, można było się spodziewać burz superkomórkowych nawet z silnymi tornadami.

Jeszcze większe zmiany w prognozie modelu GFS pojawiły się z aktualizacją z 22 lipca 2009, godz. 18Z. Przede wszystkim zmieniła się energia potencjalna dostępna konwekcyjne. Model wskazał napływ masy powietrza o większej zawartości pary wodnej (stosunek zmieszania w warstwie 0-1km AGL wynosił 13g pary wodnej na 1kg suchego powietrza) i „plamę” MLCAPE (0-1 km) około 2500 J/kg na pograniczu Czech z Polską, w rejonie Kotliny Kłodzkiej. Jest to wartość ekstremalna jak dla Polski, nawet przed burzami z 15 sierpnia 2008 modele pokazywały mniejsze CAPE liczone z tej warstwy. Dodatkowo pojawiła się w prognozach druga krótka fala środkowotroposferyczna, a strefa dolnej konwergencji znów pokrywała się ze strefą PVA spowodowaną przez pierwszą krótką falę, która jednak trochę osłabła. Obawą była druga krótka fala, gdyż przed nią pojawiło się silne pole PVA na wys. 600 hPa identyfikujące miejsce dywergencji wiatrów na tym poziomie. W prognozie modelu GFS najbardziej dynamiczna strefa z silnymi uskokami pionowymi wiatru (DLS do 30 m/s i LLS do ok. 20 m/s) pozostawała nad Polską północno – zachodnią, gdzie była też prognozowana większa wilgotność względna, a LCL wynosił około 1500m. Bardziej na południe w prognozie nadal utrzymywała się wartość DCAPE na poziomie ok. 1000 J/kg, a wartość *delta theta-e* nieznacznie wzrosła. Prognoza wektorów Corfidiego wykazywała, że szybko poruszający się układ MCS ma szansę na powstanie w południowo – zachodniej Polsce, choć z powodu prognozowanego LCL osiągającego bardzo znaczne wartości (nieduża wilgotność względna gorącej masy) oraz CIN była obawa, że nawet przy ekstremalnie dużej chwiejności nie nastąpi inicjacja zjawisk burzowych. Trudno było wtedy precyzyjnie przewidzieć cokolwiek – wiadomo było tylko, że jeśli po południu burza powstanie w obrębie Czech, południowo – zachodniej Polski i południowo – wschodnich Niemiec, to może być ona wyjątkowo gwałtowna: z opadami gradu ekstremalnych rozmiarów oraz bardzo silnymi porywami wiatru. Z powodu sporych prognozowanych uskoków wiatru w troposferze (LLS do ok. 10 – 15 m/s, DLS do ok. 20 m/s, SRH 0-3km do 200 m²/s²) przypuszczano, że może być to superkomórka lub kilka superkomórek burzowych. Istnienie wyraźnej strefy konwergencji wskazywało także na możliwość rozwoju MCS w postaci linii szkwału lub *bow echo*. Prognozy wskazywały, że burze te prawdopodobnie utworzą się bardziej na zachód, niż stało się faktycznie. Przesunięcie jednak – jak się okazało – było nieznaczne.

Prognoza z 23.07.2009, godz. 06 Z nie wiele już wniosła nowego, choć parę zmian było. Przede wszystkim należy wspomnieć o nieco mniejszym MLCAPE liczonym z warstwy 0-1km AGL, nieco mniejszej wartości Delta Theta – E oraz zaniku pola PVA od pierwszej krótkiej fali i nieznacznej intensyfikacji PVA od drugiej krótkiej fali. Strefa konwergencji nieznacznie została przesunięta na wschód. Wzdłuż tej strefy (we wschodnich Niemczech) była też prognozowana dość duża chwiejność efektywna* (duża energia potencjalna CAPE przy obecności niewielkiego CIN lub przy braku CIN). Warunki kinematyczne zasadniczo w prognozie się nie zmieniły, choć na północy Polski modele wykazywały nieco mniejsze uskoki pionowe wiatru. Generalnie pojawiły się dwie strefy większej dynamiki przepływu w troposferze, podzielone spokojniejszą strefą w Polsce Centralnej, gdzie DLS był mniejszy od LLS. Taki układ wystąpił na dość dużym obszarze Polski. W wyniku przeprowadzonych badań (Weisman, 1993) stwierdzono, że większa wartość uskoków w dolnej warstwie troposfery (np. LLS) często sprzyja burzom wielokomórkowym z wbudowanymi formacjami *bow echo*. Kilka godzin po pojawieniu się aktualizacji prognozy modelu stało się jasne, że scenariusz ten może sprawdzić się również w Polsce. Warto jeszcze wspomnieć o jeszcze wyższym prognozowanym LCL dla Polski południowo – zachodniej. Wartość DCAPE z kolei nieznacznie wzrosła. Uwzględniając prognozy modelu GFS z 23.07.2009, godz. 00 Z zespół SkyPredict, który opracowywał prognozę zjawisk konwekcyjnych na dzień 23.07.2009, zdecydował się wydać tylko drugi stopień zagrożenia, jednak zastrzegł, że możliwa jest aktualizacja prognozy do najwyższego, trzeciego stopnia zagrożenia, jeśli tylko sytuacja stanie się bardzo groźna. Decyzja ta była bardzo trudna, przede wszystkim obawiano się, że CIN i znaczny niedosyt wilgoci w troposferze mogą doprowadzić nawet do całkowitego zahamowania rozwoju zjawisk burzowych w godzinach popołudniowych – zwłaszcza w Polsce południowo-zachodniej i Czechach. Oto prognoza burzowa zespołu SkyPredict na 23.07.2010:



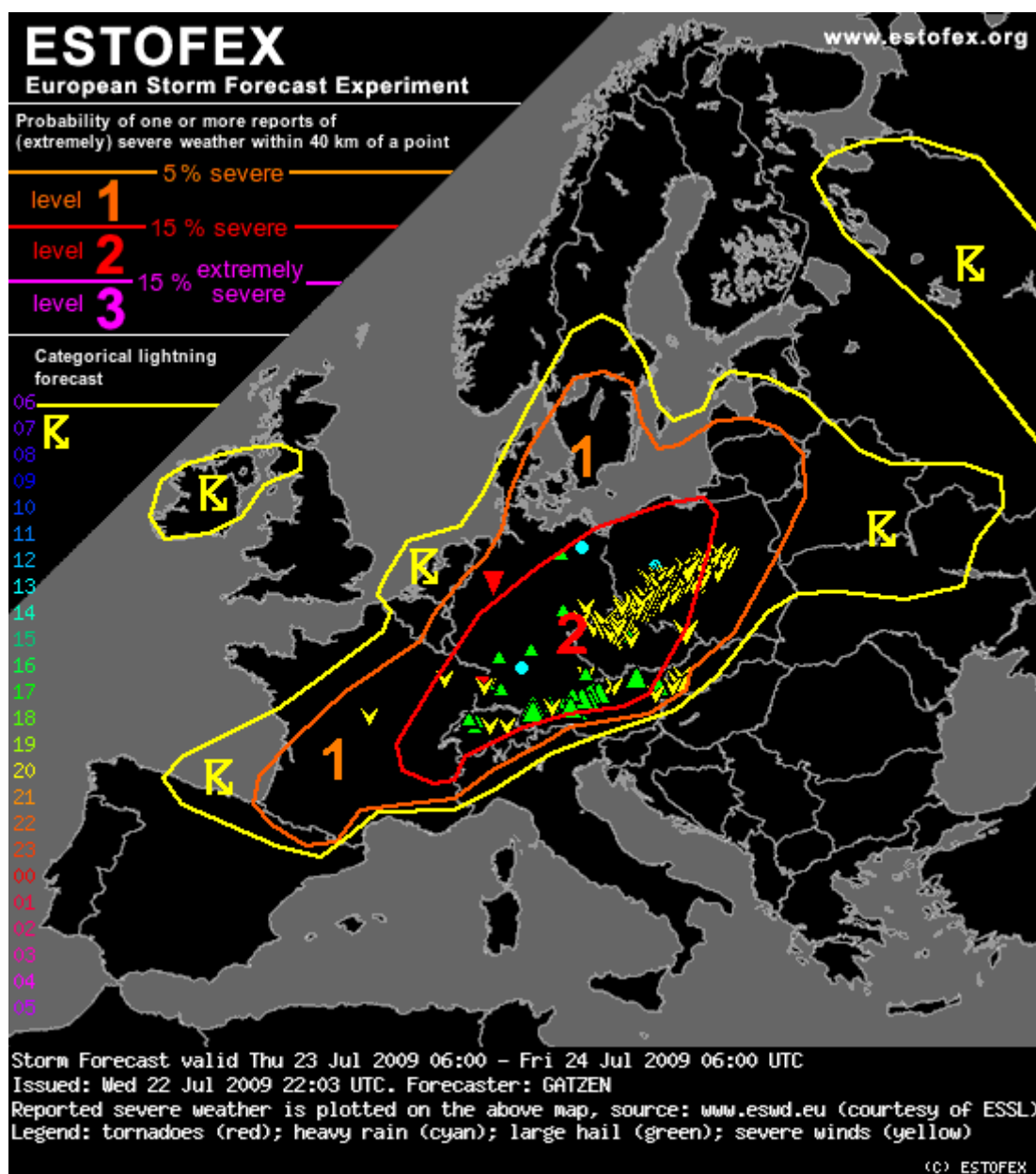
Tekst prognozy dotyczący Polski południowo-zachodniej:

...Dolny Śląsk, południe Wielkopolski...

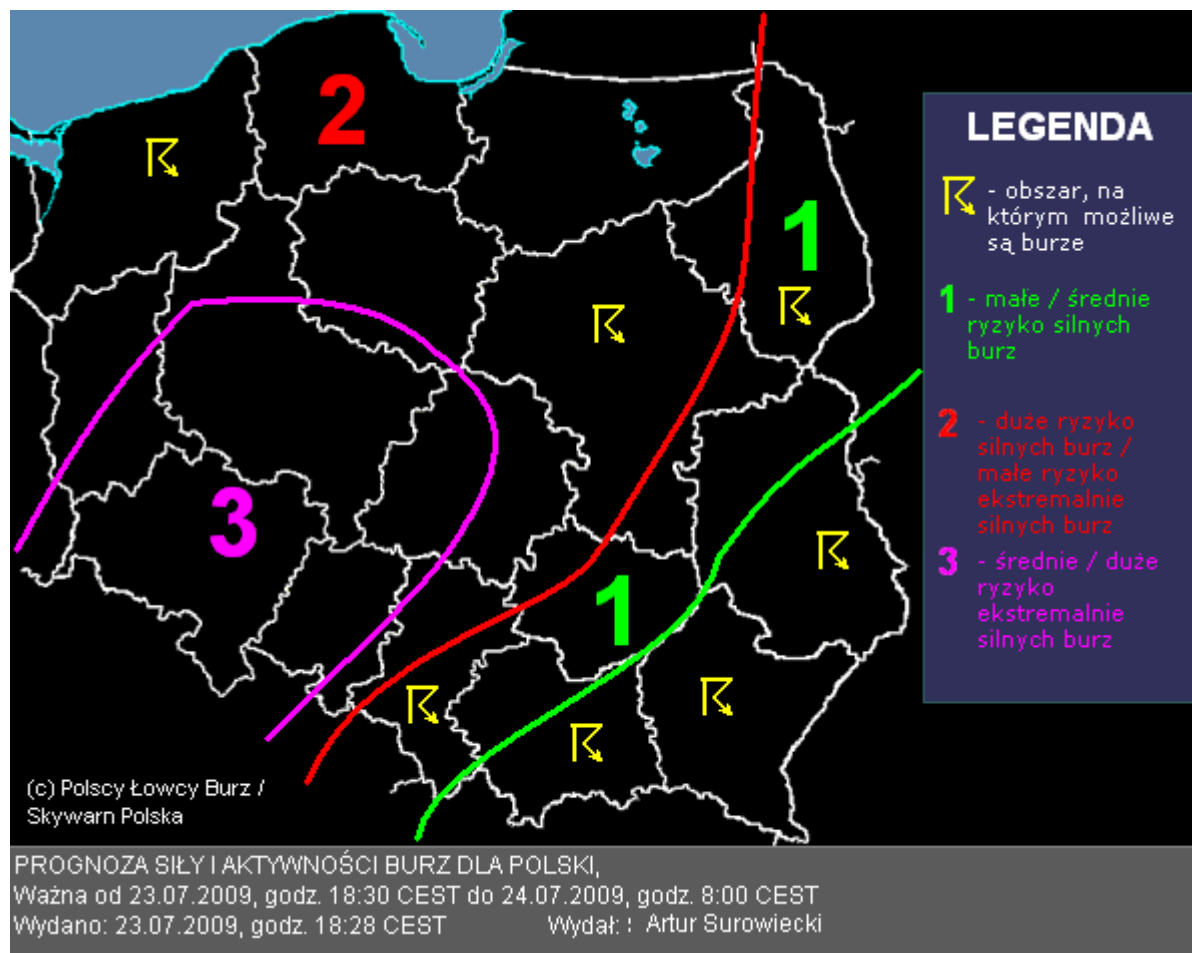
W rejonie spodziewana jest bardzo duża chwiejność termodynamiczna (MLCAPE (0-1 km) 1500-2250 J/kg). Przewidywane jest również pojawienie się silnych uskoków wiatru: prędkościowych (0-6 shear 20 m/s, 0-3 shear 15 m/s) i kierunkowych (SRH3 rzędu 150-250 m²/s²). Ograniczeniem w rozwoju zjawisk konwekcyjnych będzie warstwa hamująca oraz wysoki poziom kondensacji wynikający z niskiej wilgotności względnej powietrza. Nie wiadomo więc, czy jakiegokolwiek burze w ciągu dnia na tym obszarze w ogóle się pojawią. Jednak w przypadku zaistnienia konwekcji można się obawiać późnym popołudniem/wieczorem 1-3 silnych superkomórek burzowych z gwałtownymi zjawiskami pogodowymi. Bardzo duża energia konwekcji w połączeniu ze znacznym uskokiem wiatru, bardzo dużym gradientem temperatury w środkowej troposferze i wysoką wilgotnością właściwą w warstwie granicznej tworzą warunki do pojawienia się gradu nawet o ekstremalnych rozmiarach w czasie przechodzenia burz superkomórkowych. Zważając na suchsze powietrze w środkowej troposferze i wysoki poziom kondensacji rośnie również potencjał do pojawienia się niszczących porywów wiatru powodowanych przez te superkomórki (wskaźnik DCAPE ponad 1000 J/kg, Delta Theta E do 20 stopni). W godzinach wieczornych z zachodu wejdzie chłodny front atmosferyczny, a wzdłuż niego być może pojawi się dobrze zorganizowana burza wielokomórkowa (np. linia szkwału), zwłaszcza zważając na duże wartości prędkościowych uskoków wiatru w dolnych warstwach troposfery. Tutaj największym zagrożeniem będą bardzo silne porywy wiatru występujące na przedniej krawędzi burzy (związane z frontem szkwałowym). W godzinach nocnych na zachodzie województwa dolnośląskiego zważając na bardzo niski poziom kondensacji, podwyższony LLS i CAPE 0-3 km rzędu ponad 50 J/kg istnieje nawet pewne ryzyko pojawienia się trąby powietrznej.

Podobne stanowisko przyjął Christopf Gatzen z zespołu prognozującego zjawiska konwekcyjne na terenie całej Europy - ESTOFEX. W swojej prognozie napisał, że w regionie na północ od Alp, w tym w Czechach i w południowej Polsce po południu należy się oczekiwać dobrze zorganizowanych burz - długożyjących superkomórek burzowych oraz zjawisk *bow echo*, nadchodzących nad te rejony Europy z południowych Niemiec. Z tego powodu silne porywy wiatru, a także opady bardzo dużego gradu i pojedyncze tornada są możliwe, o ile taki scenariusz okaże się prawdziwy. Modele numeryczne pozostawiły jednak sporo wątpliwości, dlatego stopień 3 zagrożenia nie został wydany. Podobny stan utrzymywał się w kolejnych aktualizacjach prognoz numerycznych.

Obrazek 19: Prognoza zjawisk konwekcyjnych wydana przez ESTOFEX dla Europy wraz z naniesionymi raportami o groźnych zjawiskach z bazy ESWD. Stopień 3 jest najwyższym stopniem zagrożenia gwałtownymi burzami.



Z wydaniem w aktualizowanej prognozie stopnia trzeciego zagrożenia trzeba było poczekać aż do momentu zainicjowania układu MCS nad Czechami, Niemcami i Polską. Wtedy było już wiadomo, że nad Polską przejdzie wyjątkowo groźny układ burzowy. Nawet aktualizacja modelu GFS z 12 Z pokazała znacznie większe szanse na pojawienie się tego typu burzy nad Polską (co potwierdziły radiosondaże). Model też wykazał większe uskoki wiatru (DLS do 25 m/s) w godzinach 17 – 20 CEST, czyli wtedy, gdy burza się formowała. Oto aktualizacja wydana o godzinie 18:30 CEST przez Artura Surowieckiego:



... Polska południowo zachodnia – praktycznie cały obszar Dln. Śląska, Opolszczyzny, aż po Wielkopolskę i Ziemię Łódzką...

Sytuacja w końcu zaczęła się klarować. Nad Czechami powstaje potężna linia szkwałowa, zmierzająca w kierunku Polski. Linia ta ma niszczący potencjał. Już teraz w wielu miejscach notuje się porywy wiatru osiągające prędkość 100 km/h. Spodziewamy się dalszego rozwoju tej linii i dalszego nasilenia zjawisk typu niszczące porywy wiatru oraz duży / bardzo duży grad. Dodatkowo sprawę pogarsza ostatnia aktualizacja modelu GFS, który jasno wskazuje nam na rozwój układu burzowego o niespotykanej sile. Silne wspomaganie QG, które się pojawiło, oraz środowisko z dużymi uskokami pionowymi wiatru sprawi, że układ burzowy będzie długotrwały i przez długi okres może stanowić duże zagrożenie. Wygląda na to, że zjawisko przybierze skalę derecho. Prócz zagrożenia niszczącymi porywami wiatru oraz dużym gradem, nie można wykluczyć nawet dość silnych trąb powietrznych, zwłaszcza w „główkach” zjawisk bow echo, które na linii szkwałowej są bardzo możliwe. Stopień trzeciego zagrożenia dzięki tym wszystkim zjawiskom i czynnikom, zostaje wydany.

Zakończenie

Analizowany przypadek pokazuje, że zjawiska derecho, znane głównie ze Stanów Zjednoczonych, mogą występować również w Polsce. Podobnie, jak w większości przypadków z USA, również i tutaj najsilniejsze szkwały miały związek z uformowaniem się *bow echo*. Nawałnice na skalę derecho pojawiają się w Europie rzadziej niż w USA, a do ich powstania musi być spełniony szereg czynników. 23 lipca 2009 warunki termodynamiczne i kinematyczne panujące w troposferze sprzyjały dla rozwoju bardzo gwałtownych burz i były zbliżone do tych, które panują podczas zjawisk derecho w Stanach Zjednoczonych.

Przyczyną rozwoju linii burz (która później została zaklasyfikowana jako derecho) była przedfrontowa zatoka niżowa. Ze względu na warunki i strukturę, należy zaklasyfikować derecho z 23 lipca 2009 jako hybrydowe. Obecność długiej linii szkwału i jej początkowe ułożenie niemal równoległe do linii frontu to cechy seryjnych derecho. W późniejszym stadium linia burz przeorientowała się (prostopadle do średniego przepływu w troposferze) i przyjęła formę pojedynczego *bow echo*, co zalicza się jako cechę typu progresywnego.

Trzeba zaznaczyć, że oprócz znacznej chwiejności termodynamicznej i dynamicznych pionowych profilów wiatru w troposferze, znaczącą rolę w intensyfikacji podmuchów szkwałowych odegrała obecność (powyżej warstwy granicznej) suchego powietrza o bardzo dużych pionowych gradientach temperatury. Miało to związek z pojawieniem się uniesionej warstwy wymieszanej (EML – *elevated mixed layer*). Napływ takiej warstwy (w tym przypadku z Afryki) zawsze wiąże się z znacznym zwiększeniem potencjału do generowania silnych prądów zstępujących.

Należy zwrócić również uwagę na rolę czynników niesprzyjających inicjacji zjawisk konwekcyjnych w omawianym przypadku. Okazuje się, że one także miały swój wpływ na gwałtowność procesów burzowych. Warstwa hamująca (często obecna przy napływie gorącej, zwrotnikowej masy) może skutecznie wstrzymywać inicjację zjawisk konwekcyjnych. Redukuje ona jednak pionowe mieszanie powietrza i umożliwia akumulację pary wodnej oraz CAPE w najniższej warstwie troposfery. Wówczas, o ile pojawi się mechanizm (taki jak konwergencja), który pozwoli „przebić” się przez warstwę hamującą, akumulowana energia uwalnia się w postaci intensywnego rozwoju gwałtownych burz. Niska wilgotność względna w warstwie granicznej (i związany z nią wyższy poziom kondensacji chmur kłębiastych) wpływa negatywnie na rozwój chmur Cb. W przypadku, gdy zorganizowane burze zdołają się jednak rozwinąć, czynnik ten intensyfikuje konwekcyjne porywy wiatru.

Podziękowania

Autorzy powyższego opracowania chcieliby podziękować wszystkim instytucjom i osobom, które pomogły stworzyć tę obszerną pracę udostępniając zdjęcia i inne grafiki. W szczególności podziękowania należą się Czeskiemu Instytutowi Meteorologiczno – Hydrologicznemu (CHMI), który udostępnił dane radarowe oraz zdjęcia satelitarne zawarte w opracowaniu. Bardzo dziękujemy również grupie ESTOFEX za udostępnianie wizualizacji danych meteorologicznych i prognoz modelu numerycznego GFS NCEP 0.5 degree oraz Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych we Wrocławiu za udostępnienie zdjęć zniszczeń po derecho w dn. 23 lipca 2009 na terenie swoich lasów.

Przypisy

Jeffrey S. Evans, Charles A. Doswell, 2001: *Examination of Derecho Environments Using Proximity Soundings*

Stephen F. Cofridi, 2003: *Cold Pools and MCS Propagation: Forecasting the Motion of Downwind-Developing MCSs*

Brian A. Klimowski, Mark R. Hjelmfelt, Matthew J. Bunkers, 2004: *Radar Observations of the Early Evolution of Bow Echoes*

Mike Coniglio, Steve Weiss, Jeff Evans, David Bright, John Hart, Phillip Bothwell, Steve Corfidi, and Bob Johns, 2005: *Testing Forecast Tools for MCS Maintenance, Speed, and Severity*

Johns, R. H., W. D. Hirt, 1987: *Derechos: widespread convectively induced windstorms*

Przybylinski, R. W., D. M. DeCaire, 1985: *Radar signatures associated with the derecho, a type of mesoscale convective system*

Morris L. Weisman, 1993: *The Genesis of Severe, Long-Lived Bow Echoes*

Ari-Juhani Punkka, Jenni Teittinen, 2006: *Synoptic and mesoscale analysis of a high latitude derecho - severe thunderstorm outbreak in Finland on July 5 2002*

Kenneth L. Pryor: *Forecasting Convective Downburst Potential Over The United States Great Plains*