

Szymon WALCZAKIEWICZ¹, Krzysztof OSTROWSKI²

1) Uniwersytet Szczeciński, Wydział Nauk o Ziemi, Instytut Nauk o Morzu, Zakład Klimatologii i Meteorologii Morskiej, Szczecin

2) Politechnika Białostocka, Wydział Informatyki, Katedra Informatyki Teoretycznej, Białystok

Nawałnica z 4 VII 2002 r. jako przykład *bow echo* w Europie Środkowo-Wschodniej ze szczególnym uwzględnieniem burzy w Puszczy Piskiej

Słowa kluczowe: nawałnica, burza, *bow echo*, Europa Środkowo-Wschodnia, Puszcza Piska.

Streszczenie

Celem pracy była charakterystyka burzy, która przetoczyła się 4 VII 2002 r. przez środkowo-wschodnią część Europy, jako przykładu *bow echo*. Przyczyną podjęcia takiego zagadnienia był brak informacji na temat zjawiska *bow echo* w polskiej literaturze oraz słabe udokumentowanie przypadku z lipca 2002 r. Pierwszy etap opierał się na przeanalizowaniu elementów meteorologicznych, głównie temperatury powietrza, oraz prędkości i kierunku wiatru. Analizowano również rozkład układów barycznych nad tą częścią Europy i przebieg frontów atmosferycznych, zarówno na mapach górnych, jak i dolnych. Druga część polegała na analizie parametrów konwekcyjnych oraz radiosondaży. Dane, które posłużyły do opracowania, były pobrane z bazy stron internetowych: www.ogimet.com, <http://weather.uwo.edu>, www.wetterzentrale.de, www.fmi.fi. Otrzymane rezultaty pozwoliły stwierdzić, iż burza z 4 VII 2002 r. o dużym zasięgu terytorialnym, z huraganowymi prędkościami wiatru należy zaliczyć do zjawisk typu *bow echo* i to ona przyczyniła się do zniszczenia kompleksu leśnego Puszczy Piskiej.

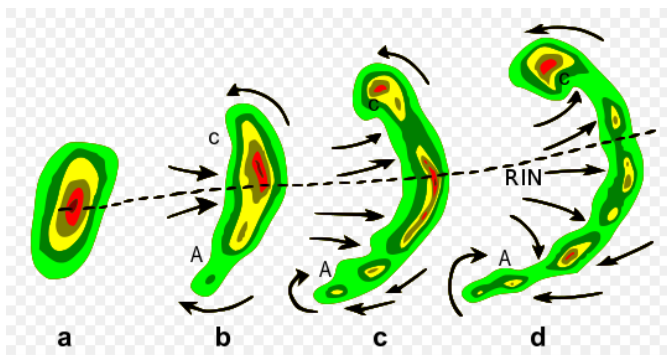
1. Wstęp

Największa w powojennej historii klęska w polskim leśnictwie przydarzyła się w Puszczy Piskiej. Huraganowy wiatr towarzyszący burzy z 4 VII 2002 r. uszkodził i zniszczył znaczną część puszczy. Pas zniszczeń miał szerokość do 15 km, a jego długość wynosiła ponad 100 km. Prędkość wiatru w porywach wynosiła sto kilkadziesiąt km/h. Szerokość pasa zniszczeń oraz jednokierunkowe ułożenie wiatrołomów oznacza, że mieliśmy do czynienia z wiatrem prostoliniowym (ang. *straight-line wind*), a nie wirowym jaki występuje w trąbie powietrznej. Należy pamiętać, że owa burza przetoczyła się nie tylko przez teren Polski, ale i przez środkowo-wschodnią część Europy, gdzie poczyniła również spore zniszczenia. Praca ma na celu przybliżenie zagadnienia występowania zjawiska *bow echo* na przykładzie burzy jaka przeszła nad Puszcza Piską oraz analizę warunków meteorologicznych jakim towarzyszyła.

Termin *bow echo* odnosi się do układów burzowych w tym bardzo często do mezoskalowych systemów konwekcyjnych (ang. *mesoscale convective system* w skrócie MCS), które przyjmują charakterystyczny kształt łuku na mapach odbiciowości radarowej. Takim układom burzowym zwykle towarzyszy bardzo silny wiatr wiejący na dużym obszarze, równoległe do toru przemieszczania się układu, który może powodować znaczne zniszczenia. Z tego powodu ten rodzaj burzy należy do szczególnie groźnych dla życia i mienia. Prekursorem badań dotyczących *bow echo* był T. T. Fujita. Duża część obecnie dostępnej wiedzy na temat tych struktur konwekcyjnych pochodzi właśnie z jego prac. W swoich badaniach dotyczących zjawiska *downburst* (towarzyszący burzom z bardzo silnymi prądami zstępującymi) zwrócił on uwagę na ich związek z występowaniem charakterystycznego obrazu odbiciowości radarowej w formie łuku, którą określił jako *bow echo*. Opracował on również schemat obrazujący cykl istnienia opisywanego zjawiska, który może być widziany na obrazach odbiciowości radarowej (rys. 1.1.).

Fujita powiązał istnienie *bow echo* z wystąpieniem silnego prądu powietrznego w tylnej części układu burzowego (ang. *rear inflow jet* w skrócie RIJ), który powoduje iż część komórek burzowych porusza się szybciej od pozostałych, co widoczne jest na zdjęciu radarowym w postaci łuku. Na obrazach radarowych charakterystyczne jest wcięcie występujące w tylnej części *bow echo*. Wcięcie to określa się mianem *rear inflow notch* (RIN) i wskazuje ono lokalizację RIJ. Właśnie w tym rejonie podmuchy wiatru są zwykle najsilniejsze.

Schemat (rys. 1.1.) obrazujący kolejne etapy rozwoju zjawiska *bow echo* (widoczne na obrazach odbiciowości radarowej) został opracowany przez Fujitę (1978). Oprócz uformowania się wyraźnego łuku, często obecne są też dwa wiry (punkty A i C). Z czasem bardziej widoczny staje się wir cyklonalny (punkt C). Najsilniejsze podmuchy wiatru występują zwykle bezpośrednio przed środkiem wybrzuszenia (linia przerywana). Ostatnią fazę (rysunek d) istnienia układu burzowego Fujita określił jako *comma echo*.



Rys. 1.1. Etapy rozwoju *bow echo*.

Źródło (Source): NOAA - <http://www.noaa.gov/>

Fig. 1.1. *Bow echo* development stages.

Układy burzowe, którym towarzyszą niszczące porywy wiatru na bardzo dużym obszarze określane są mianem *derecho*. Tego typu burze należą do szczególnie niebezpiecznych. Okazuje się, że większość wystąpień *derecho* ma związek z pojawieniem się jednej lub kilku struktur *bow echo* (opisanych poniżej) i stąd dwa powyższe terminy są ze sobą w ścisłym związku. Johns i Hirt (1987) przedstawili dwa schematy występowania *derecho*. Pierwszy z nich to utworzenie się jednego układu *bow echo* podążającego wzdłuż stacjonarnego frontu (ang. *progressive derecho*). Drugi schemat (ang. *serial derecho*) mówi o utworzeniu się wzdłuż frontu chłodnego linii szkwału w strukturze której można wyróżnić kilka segmentów *bow echo*. Ponadto stwierdzili oni, że rozwój *derecho* następuje zwykle w środowisku bardzo dużej chwiejności termodynamicznej (średni *lifted index* -9), znacznej zawartości pary wodnej (temperatura punktu rosy przy powierzchni ziemi zwykle jest równa lub wyższa niż 20°C) oraz silnego przepływu w dolnej i środkowej troposferze (średnio wiatr na poziomie 700 hPa wynosił 17 m/s, natomiast na poziomie 500 hPa 21 m/s). Ustalono także, że sprzyjającym czynnikiem do rozwoju *derecho* jest adwekcja ciepła w dolnej troposferze (850 i 700 hPa). Podobne wyniki uzyskał Johns (Johns i in., 1990) analizując 14 przypadków letnich *derecho* w USA. Stwierdził, że wartości indeksu CAPE były w tych przypadkach zwykle większe niż 2400 J/kg, natomiast pionowe uskoki wiatru (ang. *shear**) osiągały znaczne wartości (średnio 0-3 km *shear** to 15 m/s, 0-6 km *shear** to 20 m/s). Dodatkowo stwierdzono obecność warstw suchego powietrza na poziomach 700 i 500 hPa, które zwiększały siłę prądów zstępujących.

Kolejne badania dotyczyły pionowych uskoków wiatru. Stwierdzono, że zdolność do rozwoju nowych komórek wzdłuż linii burz rośnie wraz ze wzrostem pionowych uskoków wiatru prostopadłych do tej linii. Szczególnie istotne są duże prędkościowe uskoki wiatru występujące w dolnych 2-3 kilometrach troposfery. Uważa się (Rotundo i in., 1988), że chodzi tu o zgodność poziomej wirowości wytwarzanej przez front szkwałowy (ang. *gust front*) z poziomą wirowością wytwarzaną przez pionowe uskoki wiatru. Na podstawie przeprowadzanych symulacji Weisman (1993) stwierdził, że najsilniejsze zjawiska *bow echo* rozwijały się w środowisku bardzo dużej chwiejności (CAPE > 2000 J/kg) i silnych pionowych uskoków wiatru (rzędu przynajmniej 15-20 m/s w dolnych 2,5-5 km troposfery). Dodatkowo, ich rozwój był bardziej prawdopodobny w przypadkach, gdy większa część uskoków wiatru występowała w dolnych 2,5 km troposfery.

Evans i Doswell (2001) na podstawie 113 radiosondaży wykonanych w Stanach Zjednoczonych w różnych porach roku w latach 1983-1993 w USA opisali warunki meteorologiczne sprzyjające rozwojowi zjawisk *derecho*. Spektrum warunków występowania tych burz, którym towarzyszy bardzo silny wiatr okazało się szerokie. Podzielono więc *derecho* pod względem środowiska występowania na trzy grupy: ze słabym wymuszaniem (*weak forced derecho* – WF, brak tu głębokiego niżu i wyraźnej fali górnej), z silnym wymuszaniem (*strong forced derecho* – SF, cechuje się wyraźnym ośrodkiem niżowym z systemem frontów oraz krótką falą górną) oraz hybrydowe (*hybrid derecho*). Stwierdzono, że w przypadku WF *derecho* na wystąpienie rozległych, niszczących podmuchów wiatru decydujący wpływ ma zwykle bardzo duża chwiejność termodynamiczna i silne prądy zstępujące. Natomiast dla wystąpienia SF *derecho* ważniejszym czynnikiem jest silny przepływ w troposferze i duże uskoki wiatru. Okazało się również, że zwłaszcza w środowisku znacznej chwiejności termodynamicznej i dużego potencjału do generowania silnych prądów zstępujących (bardzo wysokie wartości CAPE i

DCAPE*), do wystąpienia *derecho* potrzebne są niższe wartości uskoków wiatru niż wskazywałyby na to wcześniejsze prace i symulacje (0-2 km *shear** 7-12 m/s, 0-6 km *shear** 10-20 m/s, 0-6 km średni wiatr (*ang. mean wind*) 8-12 m/s).

Układy *bow echo* są zróżnicowane pod względem rozmiarów, czasu istnienia i sposobu powstawania. Zdarzają się przypadki *bow echo* o długości od kilkudziesięciu do 200 km. Największe szkody są związane ze zjawiskami, które istnieją przez wiele godzin. Prowadzono również badania nad sposobem formowania się tych struktur (Klimowski i in., 2004). W ich wyniku stwierdzono, że w 45 % przypadków *bow echo* powstawało z kilku (zwykle 3-10) nieorganizowanych komórek burzowych. W 40 % przypadków z linii szkwału. W pozostałych 15 % przypadków struktura *bow echo* powstawała z superkomórki burzowej (zwykle typu wysokoopadowego – HP).

Prowadzono również badania dotyczące sposobu poruszania się mezoskalowych układów konwekcyjnych. Stwierdzono, że część układów burzowych porusza się znacznie szybciej niż średni wiatr w troposferze. Określa się je mianem *downwind propagating MCS*. Tego typu burze stanowią zwykle największe zagrożenie silnymi szkwałami, a ich przykładami może być linia szkwału i *bow echo*. Na prędkość ich przemieszczania oprócz przepływu w troposferze wpływa również rozwój nowych komórek wzdłuż frontu szkwałowego. Corfidi (2003) w swojej pracy opracował prostą technikę opartą o wektory średniego i dolno troposferycznego wiatru, służącą do szacowania szybkości tych układów burzowych (*ang. Corfidi II vector*).

Bow echo w Polsce zdarzają się dość rzadko, ale ich wystąpienie (zazwyczaj w porze letniej) wiąże się zwykle z najgwałtowniejszymi zjawiskami burzowymi powodującymi duże szkody wiatrowe. Do przykładów *bow echo* w naszym kraju należy burza nazwana „białym szkwałem” (21.08.2007), która spowodowała śmierć wielu osób na jeziorach mazurskich. Kolejnym przykładem może być nawałnica, która przeszła nad dużą częścią Polski 23 lipca 2009 r. powodując znaczne szkody. Rozległość (>460 km długości) i ciągłość obszaru, na którym notowano zniszczenia spowodowane przez wiatry związane z tym układem burzowym, każą uznać go jako *derecho* (www.essl.org/ESWD). Niszczące nawałnice związane z układami *bow echo* występowały również w innych krajach europejskich. 10 lipca 2002 roku *bow echo* nawiedziło wschodnią część Niemiec. Rozległy obszar oddziaływania tej nawałnicy pozwala zakwalifikować ją jako *derecho* (Gatzen, 2003). Z kolei 5 lipca 2002 roku (a więc dzień po opisywanym tutaj przypadku) w Finlandii wystąpiło *bow echo* z bardzo silnym wiatrem, które zostało zaklasyfikowane jako najbardziej wysunięte na północ *derecho* w historii (Punkka, Teittinen, 2004).

Szczególnie gwałtowne zjawiska *derecho* i *bow echo* występują w Stanach Zjednoczonych. 4 lipca 1977 wyjątkowo silna burza (określana mianem *Independence Day Derecho*) przeszła przez północne stany USA. Zniszczeniu lub poważnemu uszczerbkowi uległo wówczas 400 000 hektarów lasu. Najsilniejszy zanotowany poryw wyniósł 185 km/h, a w wielu rejonach podmuchy wiatru mogły przekraczać 200 km/h. Za dużą część szkód odpowiedzialne były wiatry szkwałowe związane z *bow echo*. Właśnie podczas badania tego przypadku po raz pierwszy terminu *bow echo* użył Fujita. Powyższy fakt pokazuje, że zniszczenia leśne na ogromną skalę nie są niczym nowym w czasie występowania zjawiska *bow echo*. (<http://www.spc.noaa.gov>)

2. Dane i metody badawcze

W opracowaniu wykorzystano dane meteorologiczne 54 stacji synoptycznych z Europy Północnej i Środkowo-Wschodniej, w tym 31 stacji z Polski, 7 z Estonii, 5 z Łotwy, 5 z Litwy, 4 ze Szwecji, 1 z Rosji (Obwód Kaliningradzki) i 1 z Białorusi. Wszystkie dane ze stacji posłużyły do wykreślenia map synoptycznych. Dane ze stacji pobrano z bazy strony www.ogimet.com w postaci depeszy SYNOP, a kontury map ze strony www.d-maps.com. Depesze synoptyczne charakteryzowały się godzinną rozdzielczością czasową dla stacji polskich i trzygodziną dla pozostałych. W związku z tym mapy synoptyczne zostały wykreślone z trzygodzinnym krokiem czasowym. Do wykreślenia radiosondażu posłużyły dane ze strony Uniwersytetu w Wyoming <http://weather.uwyo.edu/>. Diagram sondażu oraz wyliczenia parametrów konwekcyjnych zostały wykonane przez program napisany przez jednego z autorów. Mapy górne poziomów 500 hPa, 700 hPa i 850 hPa pobrano z serwisu www.wetterzentrale.de. Skan radarowy otrzymano od Fińskiego Instytutu Meteorologicznego (<http://www.fmi.fi>). Pod terminem burza autorzy artykułu rozumieją wielokomórkowy kompleks chmur Cumulonimbus (Cb) z towarzyszącymi mu wyładowaniami. Terminy oznaczone gwiazdką zostaną wytłumaczone w legendzie na końcu tekstu.

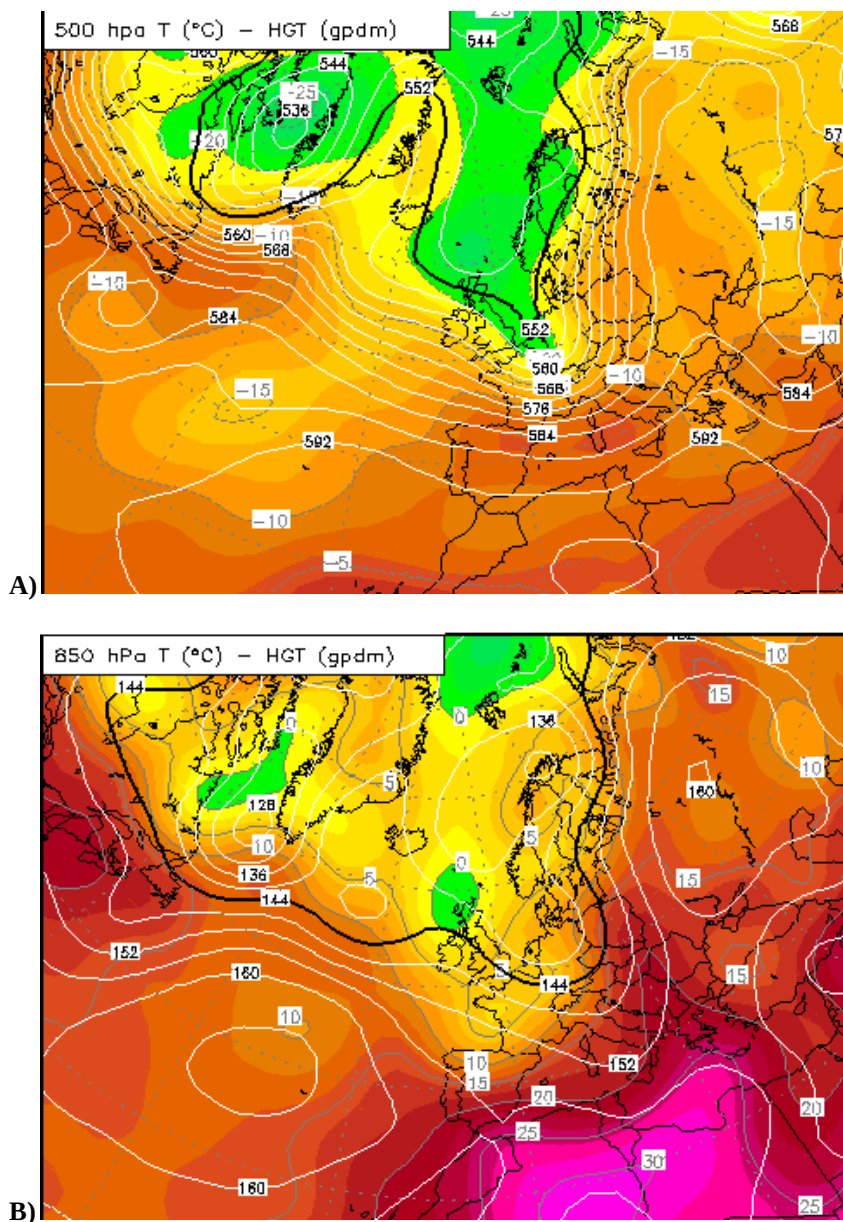
3. Analiza warunków konwekcyjnych i meteorologicznych

Przed wystąpieniem zjawiska *bow echo*, w dniach od 2 do 3 lipca 2002 r. Europa Środkowo-Wschodnia znajdowała się na pograniczu wyżu znad Rosji oraz niżu znad Morza Norweskiego. Taki układ ośrodków barycznych powodował silny napływ gorącego powietrza z rejonów południowej Europy.

3.1. Sytuacja synoptyczna w środkowej troposferze w dniu 04.07.2002 r. z godziny 00 UTC

Poziom 500 hPa (rys. 3.1. A) - Polska i Kraje Bałtyckie znajdują się po wschodniej stronie fali górnej, której oś przebiega od Morza Północnego przez Kraje Beneluksu po Alpy. Między wspomnianą falą, a wyżej z Rosji występuje silne zagęszczenie izohips, co skutkuje wzmożonym przepływem powietrza z południowego-zachodu nad Europą Środkowo-Wschodnią.

Poziom 850 hPa (rys. 3.1. B) - W Europie Środkowej istnieje wyraźna strefa frontowa oddzielająca dwie zróżnicowane termicznie masy powietrza. Do wschodniej połowy Polski napływa z południa gorące powietrze pochodzenia zwrotnikowego (15-20°C), które kieruje się w stronę Krajów Bałtyckich. Tymczasem w Niemczech temperatura powietrza na tej wysokości wynosi 5-10°C. Występuje tam wyraźna zatoka niżowa i związany z nią front chłodny przemieszczający się z zachodu nad obszar Polski.



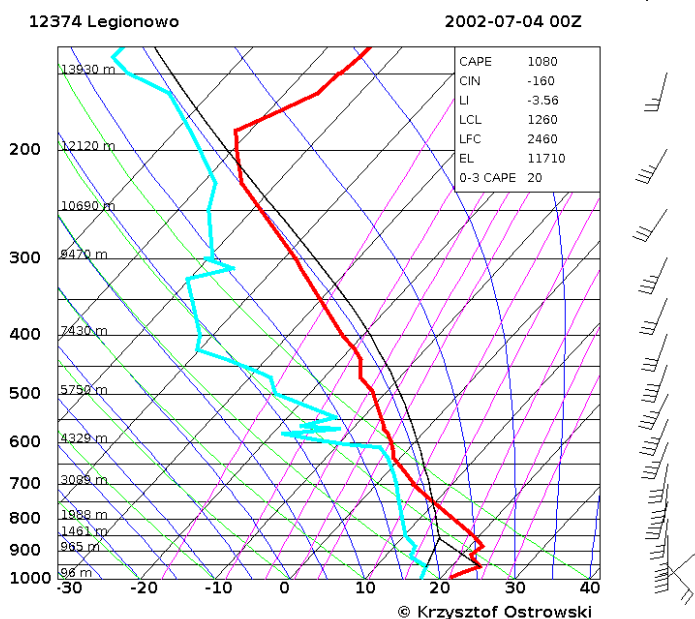
Rys. 3.1. Mapa wysokości geopotencjału 500 hPa (A) oraz temperatury powietrza na 850 hPa i wysokości geopotencjału 850 hPa (B).

Źródło (Source): www.wetterzentrale.de

Fig. 3.1. Geopotential height map of 500 hPa (A), air temperature on 850 hPa and geopotential height of 850 hPa (B).

3.2. Analiza diagramu aerologicznego z dnia 04.07.2002 r. z godziny 00UTC

Przedstawiony poniżej radiosondaż (rys. 3.2) został wykonany w Legionowie na 10 godzin przed nawałnicą w Puszczy Piskiej. Należy zwrócić uwagę na silny napływ zwrotnikowej masy powietrza w dolnej troposferze. Na poziomie 850 hPa temperatura wynosiła 19°C (wyraźna adwekcja ciepła: 5°C w 12 godzin), natomiast prędkość wiatru na 900 hPa (niecały 1 km nad ziemią) to niemal 19 m/s. Masa powietrza cechowała się dodatkowo wysoką zawartością pary wodnej (średni stosunek zmieszania z dolnych 500 metrów troposfery to 12,6 g/kg). Powyżej występował bardzo duży pionowy gradient temperatury (7,7°C/km w warstwie od 2 do 4 km nad ziemią) sprzyjający gwałtownym zjawiskom konwekcyjnym. W rezultacie masa powietrza odznaczała się dość znaczną (jak na porę nocną) chwiejnością termodynamiczną (MUCAPE* 1080 J/kg). Czynnikiem sprzyjającym silnym, burzowym prądom zstępującym jest warstwa suchego powietrza powyżej poziomu 600 hPa oraz wspomniany wcześniej znaczny pionowy gradient temperatury w środkowej troposferze. Termodynamiczne wskaźniki intensywności prądów zstępujących osiągały umiarkowane wartości (DCAPE* 660 J/kg, delta theta-e* 12°C), jednak biorąc pod uwagę nocne, radiacyjne ochładzanie warstwy granicznej, w ciągu dnia te parametry mogły wzrosnąć.



Rys. 3.2 Radiosondaż wykonany w Legionowie z godziny 00 UTC.

Źródło (Source): dane – <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>; opracowanie – Autor

Fig. 3.2 Sounding made in Legionowo 00 UTC.

Warunki kinematyczne faworyzowały rozwój gwałtownych i zorganizowanych burz. Wspomniany już silny przepływ zwrotnikowego powietrza w dolnej troposferze (ang. *low level jet*) mógł odegrać ważną rolę w intensyfikacji podmuchów burzowych w czasie

nawałnicy. Również w wyższej troposferze wiatr osiągał duże prędkości (16 m/s na 700 hPa oraz 20 m/s na 500 hPa). Ostatnie dwie wartości są bliskie tym, o których pisali Johns i Hint (1987) w kontekście badań *derecho*. Średni wiatr z dolnych 6 kilometrów wyniósł 16 m/s. Największy przyrost prędkości wiatru nastąpił w dolnej troposferze. Stąd obecność silnych pionowych uskoków wiatru, z których większość zlokalizowana jest w dolnych kilometrach ($0-6\text{ km shear}^* = 24\text{ m/s}$, $0-3\text{ km shear}^* = 18\text{ m/s}$, $0-2\text{ km shear}^* = 18\text{ m/s}$, $0-1\text{ km shear}^* = 20\text{ m/s}$). Taki pionowy profil wiatru pasuje do koncepcji Weismana (1993) dotyczących rozwoju gwałtownych *bow echo*. Bardzo duży skręt i przyspieszenie wiatru w dolnej troposferze ($SRH^* (0-1)\text{ km} = 350\text{ m}^2/\text{s}^2$) w połączeniu ze znacznymi uskokami wiatru w warstwie granicznej sprzyjała rozwojowi mezocyklonalnych trąb powietrznych. Niewykluczone, że takie pojawiły się na Mazurach, jednak ogromna większość szkód to z pewnością efekt oddziaływania bardzo silnego podmuchu burzowego.

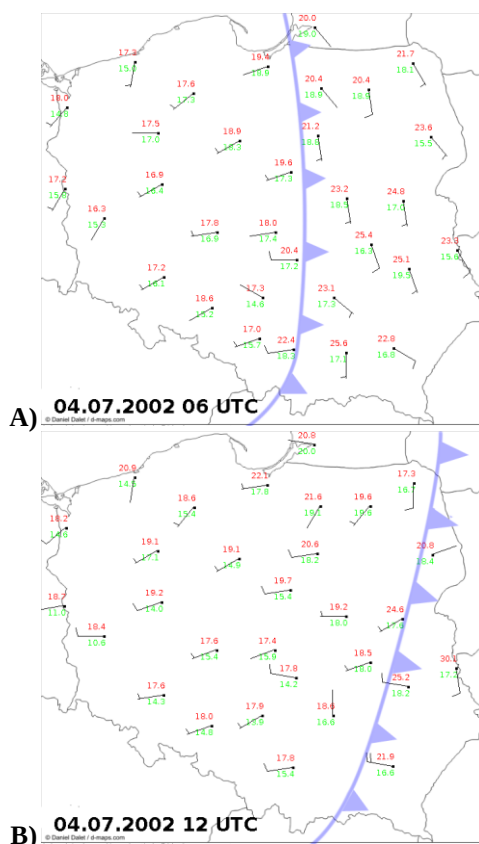
Parametr DCP (ang. *derecho composite parameter*) pomocny w ocenianiu ryzyka wystąpienia nawałnic z silnym wiatrem wynosi ponad 1. To jeden z tylko kilku przypadków w ostatnich 10 latach, gdzie ten wskaźnik osiąga wartość bliską 1 lub większą w czasie wykonywania nocnego radiosondażu na terenie Polski. Ten fakt świadczy o tym, że warunki sprzyjały rozwojowi gwałtownych burz. Pozostałe przypadki również były związane z bardzo silnymi zjawiskami burzowymi w Polsce lub u naszych sąsiadów (15/16 VII 2001, 10/11 VII 2002, 29/30 VII 2005, 20/21 VIII 2007, 23/24 VIII 2007). DCP uwzględnia w swoich wyliczeniach chwiejność termodynamiczną ($MUCAPE^*$), energię prądów zstępujących ($DCAPE^*$), siłę przepływu (średni wiatr 0-6 km) oraz pionowe uskoki wiatru ($0-6\text{ km shear}^*$).

3.3. Warunki meteorologiczne

3.3.1. 04.07.2002 r. 00 UTC - 06 UTC

O godzinie 06 UTC Europa Środkowo – Wschodnia znajdowała się pod wpływem niżu z centrum nad południowym Bałtykiem (rys. 3.4. A). Dwa fronty (ciepły i chłodny) rozdzielały gorące i wilgotne masy powietrza zwrotnikowego, napływające z południa Europy od chłodniejszych mas powietrza polarnomorskiego z zachodniej i północno-zachodniej Europy. Front chłodny (rys. 3.3. A, rys. 3.4. A) ciągnął się z północy na południe, od Warmii przez Mazowsze, Ziemię Łódzką po Małopolskę. Front ciepły (rys. 3.4. A) miał przebieg równoleżnikowy z zachodu na wschód, od centrum niżu przez środkową część Litwy. W wycinku ciepłym temperatura powietrza oscylowała w granicach od $20,0^\circ\text{C}$ w Kaliningradzie do $23,6^\circ\text{C}$ w Białymstoku, natomiast za frontem chłodnym od $16,3^\circ\text{C}$ w Zielonej Górze do $19,6^\circ\text{C}$ w Płocku. Punkt rosy osiągał w Polsce NE wysokie wartości bliskie 18°C - 19°C . Wiatr wiał z sektora wschodniego przed frontem ciepłym oraz z kierunku południowo – wschodniego i południowego w ciepłym wycinku niżu. Za frontem chłodnym dominującym kierunkiem wiatru był kierunek południowo – zachodni i zachodni.

O 06.30 UTC na Wyżynie Małopolskiej zaczyna powoli formować się omawiana burza. Jednak jedynie w Sulejowie zanotowano wystąpienie burzy w trakcie pomiaru o 06 UTC.



Rys. 3.3. Sytuacja synoptyczna nad Polską 4 lipca 2002 r.: A) o 06 UTC; B) o 12 UTC.

Zródło (Source): kontury mapy - http://d-maps.com/carte.php?lib=poland_map&num_car=2471&lang=en; opracowanie - Autor

Fig. 3.3. Synoptic situation over Poland on 4 July 2002: A) 06 UTC; B) 12 UTC.

3.3.2. 04.07.2002 r. 07 UTC - 11 UTC

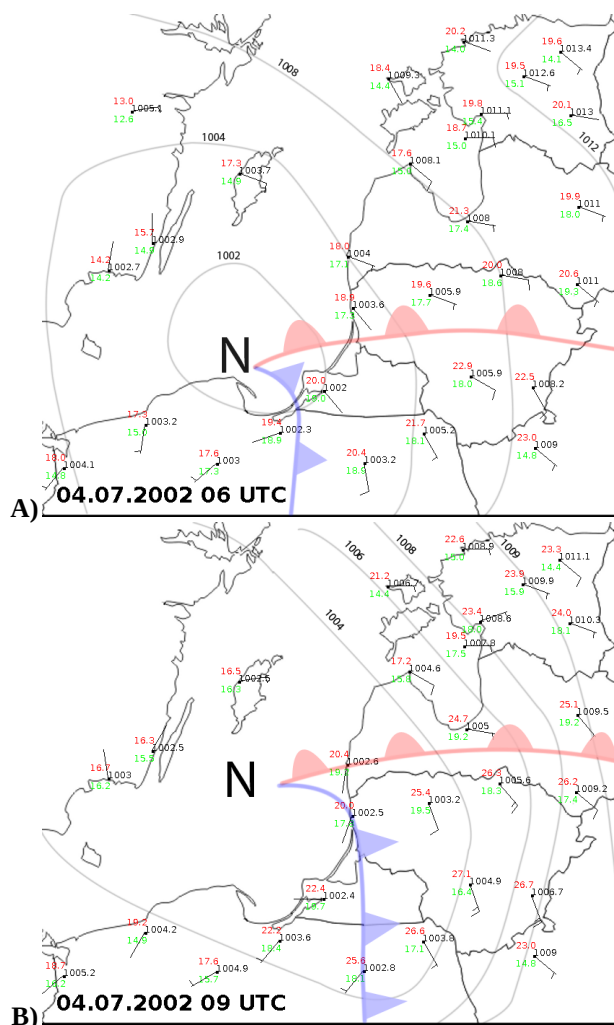
Centrum niżu przesunęło się w kierunku północnym i o godzinie 09 UTC znajdowało się na południe od Gotlandii. Front ciepły przesunął się bardziej na północ w pobliże granicy Litwy z Łotwą. Front chłodny natomiast rozciągał się od centrum niżu przez zachodnie wybrzeża Łotwy i Litwy, następnie przez centrum Obwodu Kaliningradzkiego i dalej w kierunku południowym przez obszar Polski (rys. 3.4. B).

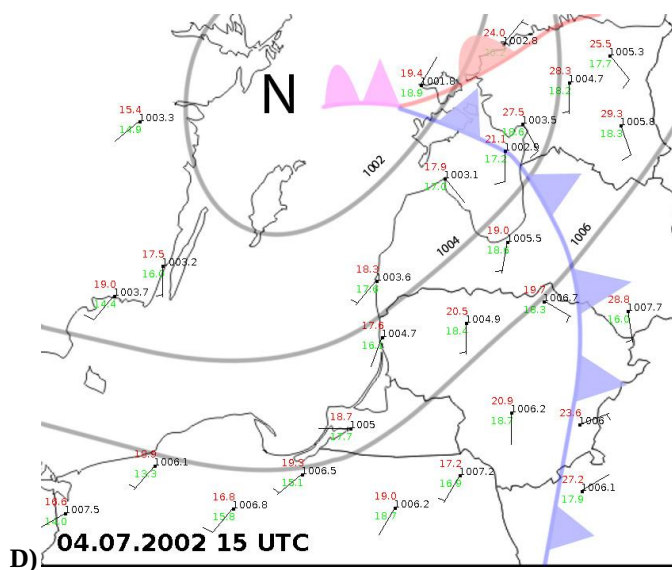
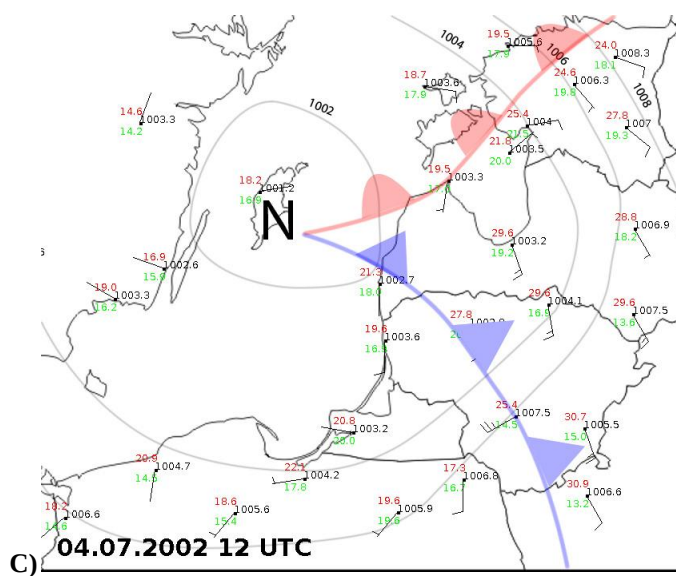
Burza z Wyżyny Małopolskiej wędrowała bezpośrednio przed frontem chłodnym, w niedalekiej odległości od niego, w ciepłym wycinku niżu. Konwergencja i ruchy wznoszące w strefie frontowej powodowały rozwój chmur burzowych Cumulonimbus. Burza z godziny na godzinę przybierała na sile podtrzymywana przez ciepłe i wilgotne powietrze zwrotnikowe. Burza między 06 UTC, a 09 UTC przechodziła przez centralną i wschodnią część Polski. W tym czasie burzę notowano na stacji w Płocku, natomiast w

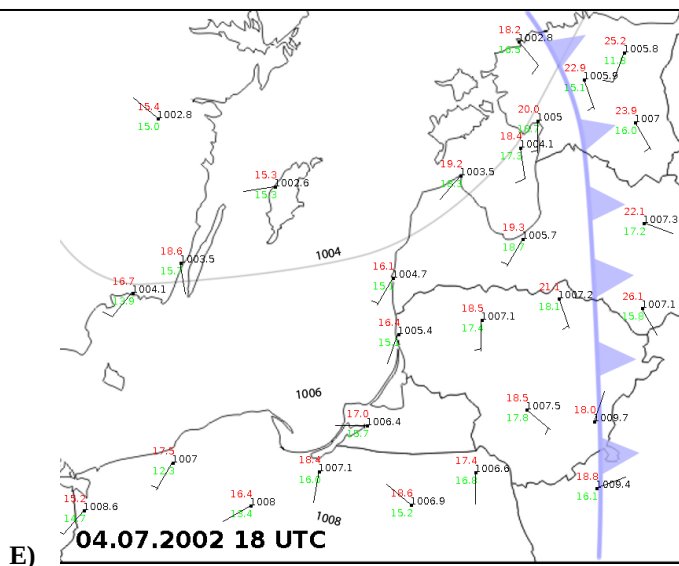
Mławie, Kozienicach i Warszawie (Okęcie) zanotowano burzę w czasie obserwacji o godzinie 09 UTC.

Już przed południem burza zaczęła przekształcać się w mezoskalowy system konwekcyjny (MCS), który przypuszczalnie na Mazurach przybrał postać *bow echo*. Brak danych radarowych z tego obszaru nie pozwala jednak precyzyjnie stwierdzić kiedy to nastąpiło.

W Polsce między godziną 11 a 12 UTC pojawiały się pierwsze porywy wiatru towarzyszące omawianemu zjawisku: w Mławie 50 km/h, Mikołajkach 68 km/h. Najwyższy zanotowany poryw wiatru wystąpił w Suwałkach o godzinie 11 UTC i wyniósł 93 km/h.







Rys. 3.4. Sytuacja synoptyczna nad Europą Środkowo – Wschodnią 4 lipca 2002 r.:

A) o 06 UTC; B) o 09 UTC; C) o 12 UTC; D) o 15 UTC; E) o 18 UTC.

Źródło (Source): kontury mapy - http://d-maps.com/carte.php?lib=baltic_sea_map&num_car=5041&lang=en; opracowanie - Autor.

Fig. 3.4. Synoptic situation over Eastern – Central Europe on 4 July 2002:

A) 06 UTC; B) 09 UTC; C) 12 UTC; D) 15 UTC; E) 18 UTC.

W związku z tym, że Puszcza Piska leży na południowy – zachód od Suwałk, a wędrujący MCS przemieszczał się w kierunku północnym, autorzy przyjmują, że burza prawdopodobnie przechodziła przez puszcze między godziną 10 a 11 UTC poczynając w tym czasie ogromne spustoszenia w drzewostanie.

3.3.3. 04.07.2002 r. 12 UTC

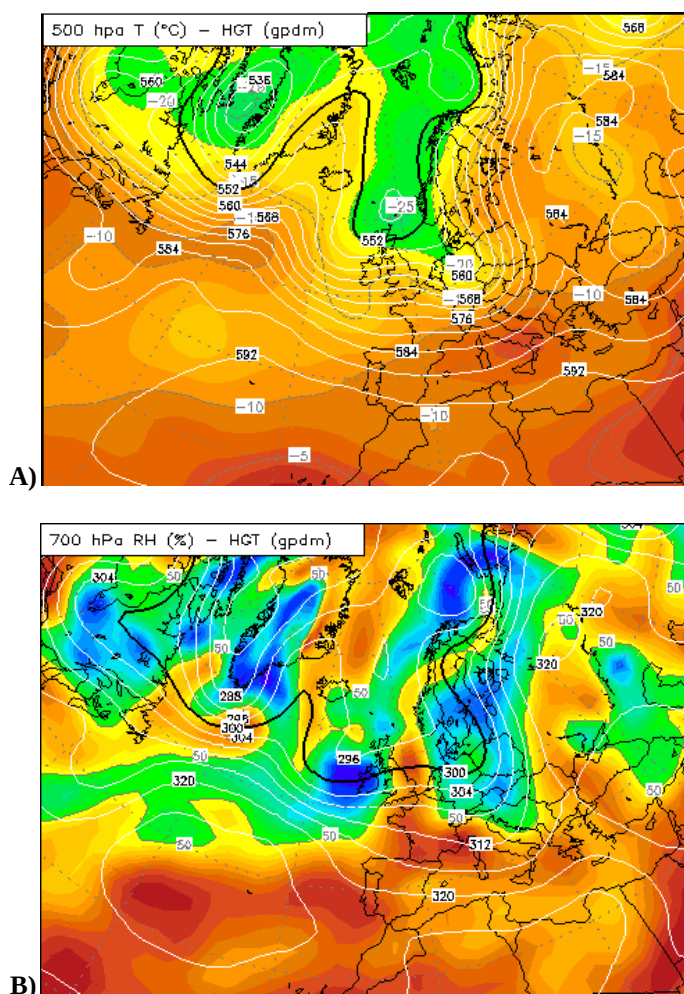
Poziomy 500 i 700 hPa - Fala Rossby’ego widoczna na mapach geopotencjału 500 hPa i 700 hPa (rys. 3.5. A) zbliżyła się z zachodu do naszego kraju. Związany z nią silny wiatr obejmował swoim zasięgiem znaczny obszar Polski. Potwierdzeniem jest sondaż z Legionowa z 12 UTC, gdzie prędkość wiatru na 700 i 500 hPa wynosiła około 25 m/s. Zwraca uwagę wzmożony przepływ powietrza nad Krajami Bałtyckimi (rys. 3.5. B) w czasie przechodzenia *bow echo*. Warunki kinematyczne w trakcie trwania nawałnicy były więc sprzyjające (silny przepływ powietrza w środkowej troposferze i duże pionowe uskoki wiatru).

Poziom 850 hPa (rys. 3.6.) - Strefa frontowa przesunęła się bardziej na wschód, a gorąca masa powietrza z południa dotarła niemal do Zatoki Fińskiej. Chłodne powietrze polarnomorskie napłynęło znan Niemiec i objęło zachodnią połowę Polski.

Na mapach synoptycznych niż przesunął się na północ, a jego centrum o godzinie 12 UTC znajdowało się bezpośrednio nad Gotlandią (rys. 3.4. C). Szybko przemieszczający

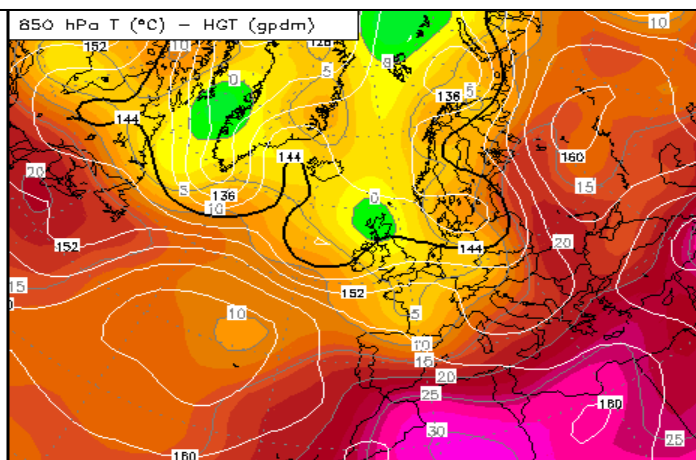
się front ciepły na omawianym terenie rozciągał się z południowego-zachodu na północny-wschód od Lipawy (Łotwa) przez Zatokę Ryską po północną Estonię. Front chłodny przebiegał z północy na południe od okolic stacji Lipawa przez zachodnią część Litwy i wschodnią Polskę (rys. 3.3. B, rys. 3.4. C).

Kontrast termiczny między ciepłym, a zimnym wycinkiem niżu był duży. Temperatura powietrza w Wilnie wyniosła 30,9°C, a w Mikołajkach, które były po przejściu frontu atmosferycznego już tylko 19,6°C.



Rys. 3.5. Mapa powierzchni geopotencjału 500 hPa (A) oraz wysokości geopotencjału 700 hPa (B).
Źródło (Source): www.wetterzentrale.de

Fig. 3.5. Geopotential height map of 500 hPa (A) and geopotential height of 700 hPa (B).



Rys. 3.6. Mapa temperatury powietrza na 850 hPa oraz wysokość geopotencjału 850 hPa.

Źródło (Source): www.wetterzentrale.de

Fig. 3.6. Map of air temperature at 850 hPa and geopotential height of 850 hPa.

Burza o 12 UTC obejmowała większość obszaru Litwy. Porywy związane z MCS były notowane na stacjach: Wilno 50 km/h i Szawle (Litwa) 54 km/h, a największy poryw zanotowano na stacji w Kownie i wyniósł aż 97 km/h. MCS był podtrzymywany występującą przed nim silną adwekcją ciepłej i wilgotnej masy powietrza (punkt rosy wynosił 19°C-21°C).

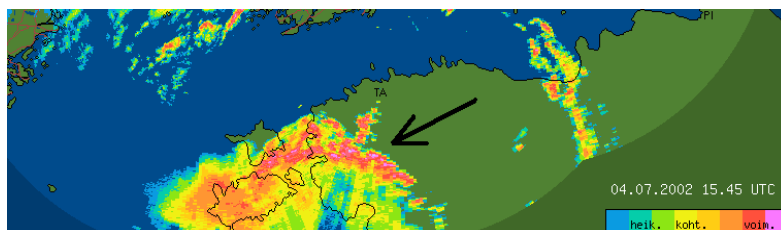
3.3.4. 04.07.2002 r. 15 UTC

Ośrodek niskiego ciśnienia przesunął się dalej na północ, a jego centrum znajdowało się na wschód od Sztokholmu (rys. 3.4. D). Pojawił się front okluzji o niewielkim zasięgu terytorialnym. Front ciepły odsunął się w kierunku Finlandii, a front chłodny pozostał nad krajami bałtyckimi przecinając Zatokę Ryską, środkową Łotwę i wschodnią Litwę. Temperatura w wycinku ciepłym niżej była nadal wysoka, osiągając 29,3°C w Tartu (Estonia).

Około godziny 13 UTC burza wkroczyła na teren Łotwy, a o 15 UTC po przejściu Zatoki Ryskiej dotarła do Estonii. MCS spowodował silne podmuchy wiatru notowane na kolejnych stacjach: w Rydze 83 km/h, Dyneburgu 50 km/h, Kolka 46 km/h.

3.3.5. 04.07.2002 r. 18 UTC

Nad omawianym obszarem Europy Środkowo – Wschodniej zalegał front chłodny rozciągający się od środkowej Estonii, przez wschodnią Łotwę, północno – wschodnie krańce Litwy i Wyżynę Białoruską (rys. 3.4. E). Burza po opuszczeniu Estonii około 17 UTC skierowała się do południowej Finlandii gdzie osłabła. Z obrazu radarowego widać, że omawiany MCS jest przykładem *bow echo*. Świadczy o tym widoczne wygięcie na linii burzy (rys. 3.7.).



Rys. 3.7. Odbiciowość radarowa z widocznym wybrzuszeniem (*bow echo*) na terenie Estonii.

Źródło (Source): www.fmi.fi (Fiński Instytut Meteorologiczny)

Fig. 3.7. Radar reflectivity with the visible bulge (*bow echo*) in Estonia.

Do godziny 18 UTC notowano silne porywy wiatru na stacjach synoptycznych: Parnawa 68 km/h, Pakri 86 km/h i wyspa Kihnu 101 km/h. Poryw na wyspie Kihnu był największym porywem odnotowanym podczas trwania omawianej burzy.

4. Podsumowanie

Opisywana burza z dnia 4 lipca 2002 r. jaka przeszła na obszarze Europy Środkowo-Wschodniej jest przykładem mezoskalowego systemu konwekcyjnego (MCS), który przybrał charakterystyczną formę zwaną *bow echo*.

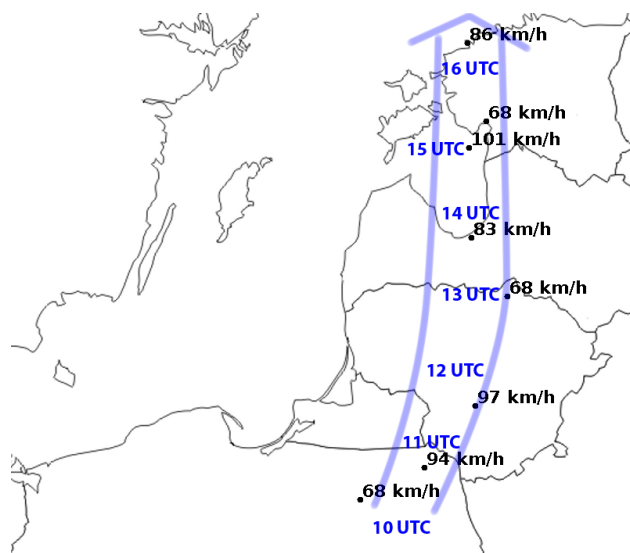
Przypadki *bow echo* są dobrze udokumentowane w Stanach Zjednoczonych i są znane z powodowania ogromnych strat w leśnictwie i mieniu. Na stronie NOAA (<http://www.spc.noaa.gov/misc/AbtDerechos/derechofacts.htm#historic>) istnieje wykaz najgwałtowniejszych w USA burz z silnym wiatrem (*derecho*), z czego większość z nich jest związana z wystąpieniem zjawiska *bow echo*. Również w Europie jest opisanych kilka przypadków *bow echo* m.in. w Niemczech w 2002 roku (Gatzen, 2003) oraz w Finlandii w 2002 roku (Punkka, Teittinen, 2004).

Początki formowania się omawianej burzy przypadały na godziny poranne nad obszarem Wyżyny Małopolskiej. Około godziny 10-11 UTC MCS, prawdopodobnie już w formie *bow echo* dotarł nad Puszczę Piską. Następnie burza przeszła przez Kraje Bałtyckie, a w czasie jej przechodzenia silne porywy wiatru dochodziły do 101 km/h. Układ burzowy przemieszczał się w ciepłym wycinku niżu i pod koniec dnia dotarł do wybrzeży Finlandii, gdzie osłabł.

Powstaniu tak gwałtownego zjawiska sprzyjała silna adwekcja gorącej i chwiejnej masy powietrza zwrotnikowego oraz silny wiatr i duże pionowe uskoki wiatru w dolnej i środkowej troposferze. Wszystkie te czynniki przyczyniły się do uformowania mezoskalowego systemu konwekcyjnego z bardzo silnymi porywami wiatru.

Zasięg terytorialny burzy w dniu 4 lipca 2002 r. rozciągał się od centralnej części Polski przez Kraje Bałtyckie po Zatokę Fińską. W ciągu 6 godzin (10 UTC - 16 UTC) bardzo szybko przemieszczający się układ *bow echo* pokonał dystans około 600 km (od Mazur po północną Estonię; rys. 4.1.). Długa trasa gwałtownej burzy (większa niż 460 km) pozwala przypuszczać, że mieliśmy do czynienia z *derecho*. Jednak brak szczegółowych informacji o zniszczeniach z rejonu Krajów Bałtyckich uniemożliwia jednoznacznie stwierdzenie tego faktu.

Należy zaznaczyć, że większość zniszczeń nie była spowodowana trąbą powietrzną, a podmuchem burzowym związanym z MCS, na co wskazuje szerokość pasa zniszczeń oraz jednokierunkowe ułożenie powalonych drzew. Burza poczyniła ogromne straty nie tylko w drzewostanie Puszczy Piskiej. Według Najwyższej Izby Kontroli „huragan ten spowodował uszkodzenia w drzewostanie w 16 nadleśnictwach na łącznej powierzchni 45,4 tys. ha (...), z czego 12 tys. ha dotyczyło terenów Puszczy Piskiej, co stanowiło 11% jej ogólnego obszaru” (www.nik.gov.pl). Szkody wiatrowe notowano również w Krajach Bałtyckich. Oprócz lasów, zniszczeniu uległo też mienie ludności mieszkającej w zasięgu burzy. Na szczęście nikt nie zginął mimo tego, że niektórzy przebywali poza swoimi domami, na otwartym terenie. Odbudowa lasu na tych terenach potrwa kilkadziesiąt lat. Na części Puszczy Piskiej pozostawiono wiatrolomy. Ma to na celu zaobserwowanie jak przyroda poradzi sobie sama ze skutkami wichury. Należy również pamiętać, że las jest schronieniem dla wielu gatunków zwierząt i ptaków. Jego brak może spowodować, zmniejszenie lub całkowity zanik niektórych gatunków na tym terenie.



Rys. 4.1. Maksymalne porywy wiatru oraz orientacyjna trasa burzy w dniu 4 lipca 2002 r.

Źródło (Source): kontury mapy - http://d-maps.com/carte.php?lib=baltic_sea_map&num_car=5041&lang=en; porywy wiatru – www.ogimet.com; opracowanie – Autor.

Fig. 4.1. Maximum wind gusts and the approximate route of the storm on 4 July 2002.

Legenda

MUCAPE - energia konwekcji (CAPE) dostępna dla powietrza unoszonego z poziomu o największej temperaturze ekwiwalentno-potencjalnej w dolnej troposferze (0-3 km nad ziemią) (http://w1.spc.woc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/help_mucp.html).

DCAPE - energia konwekcji prądów zstępujących
(http://w1.spc.woc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/help_DCAPE.html)

SRH (ang. storm relative helicity) - miara potencjału do wystąpienia rotacji w obrębie prądu wstępującego chmury Cb. Rośnie wraz ze wzrostem skreśu i prędkości wiatru w dolnej troposferze (http://w1.spc.woc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/help_srh.html).

shear - pionowy uskok wiatru w danej warstwie (np. 0-1 km).

delta theta-e - różnica między temperaturą ekwiwalentno-potencjalną powietrza przy powierzchni ziemi, a najniższą w środkowej troposferze.

Literatura

- [1] Brian A. Klimowski, Mark R. Hjelmfelt, Matthew J. Junkers, 2002: Radar Observations of the Early Evolution of Bow Echoes, *Wea. Forecasting*, 19, 727-734.
- [2] Corfidi, S. F., 2003: Cold Pools and MCS Propagation: Forecasting the motion of downwind-developing MCSs. *Wea. Forecasting*, 18, 265-285.
- [3] Evans, J. S., and C. A. Doswell III, 2001: Examination of derecho environments using proximity soundings. *Wea. Forecasting*, 16, 329-342.
- [4] Gatzert, C., 2004: A derecho in Europe: Berlin, 10 July 2002. *Wea. Forecasting*, 19, 639-645.
- [5] Johns, R. H., K. W. Howard, and R. A. Maddox, 1990: Conditions associated with long-lived derechos - An examination of the large-scale environment. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 408-412.
- [6] Johns, R. H., W. D. Hirt, 1987: Derechos: widespread convectively induced windstorms. *Wea. Forecasting*, 2, 32-49.
- [7] Punkka, A.-J., and J. Teittinen, 2004: The severe thunderstorm outbreak in Finland on 5 July 2002. Preprints, 22nd Conf. on Severe Local Storms, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., Paper P4.9, 7pp.
- [8] Rotunno, R. J., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, 45, 463-485.
- [9] T. T. Fujita, 1978: Manual of downburst identification for project NIMROD. Satellite and Mesometeorology Res. Pap. No. 156, University of Chicago, Dept. of Geophysical Sciences, pp. 104.
- [10] Weisman, M. L., 1993: The genesis of severe, long-lived bow echoes. *J. Atmos. Sci.*, 50, 645-670.
- [11] Weisman, M. L., 2001: Bow echoes: A tribute to T. T. Fujita. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 97-116.
- [12] <http://www.spc.noaa.gov/misc/AbtDerechos/casestudies/jul41977page.htm>.
- [13] http://bip.nik.gov.pl/bip/wyniki_kontroli_wstep/inform2004/2003194
- [14] <http://www.fmi.fi>.
- [15] <http://www.wetterzentrale.de>.
- [16] <http://www.ogimet.com>.
- [17] www.essl.org/ESWD
- [18] <http://w1.spc.woc.noaa.gov>

Severe storm of 4 July 2002 as example of bow echo in Eastern – Central Europe with particular reference to the storm in Piska Forest

Keywords: severe storm, bow echo, East - Central Europe, Piska Forest.

The purpose of this work is to characterize meteorological conditions associated with formation of a severe thunderstorm which occurred on the 4-th of July 2002 in Eastern-Central Europe and caused biggest damage in postwar history of Polish forestry (45 000 hectares of forest blown down). The windstorm is an example of bow echo, a kind of mesoscale convective system (MCS) known for producing long swaths of damaging straight-line winds. The conditions on that day were favorable for bow echo formation. Intense advection of warm and unstable air mass (low level jet), strong flow and large vertical wind shear* in low and middle levels of the troposphere were conducive for development of MCS with severe wind gusts. Origins of the storm were in southern Poland where convection was initiated early morning ahead of the cold front. At about 10 UTC MCS (probably with embedded bow echo) formed in NE Poland. After destroying a large part of Piska Forest, the storm headed north towards Baltic States. Severe wind gusts (>25 m/s) were measured in Poland, Lithuania and Estonia during gust front passage. The MCS traveled in the warm sector and was maintained by strong warm air advection which was occurring ahead of the storm. Doppler radar images from Finland showed bow echo signature over Estonia in the afternoon. The storm system reached southern Finland at about 18 UTC and weakened. The fast-propagating convective system covered the distance of 600 km from northern Poland to northern Estonia in about 6 hours. Long track (>460 km) of this severe storm suggests that it could be classified as derecho. However, with the lack of detailed information on damage in the Baltic States, it cannot be fully confirmed.