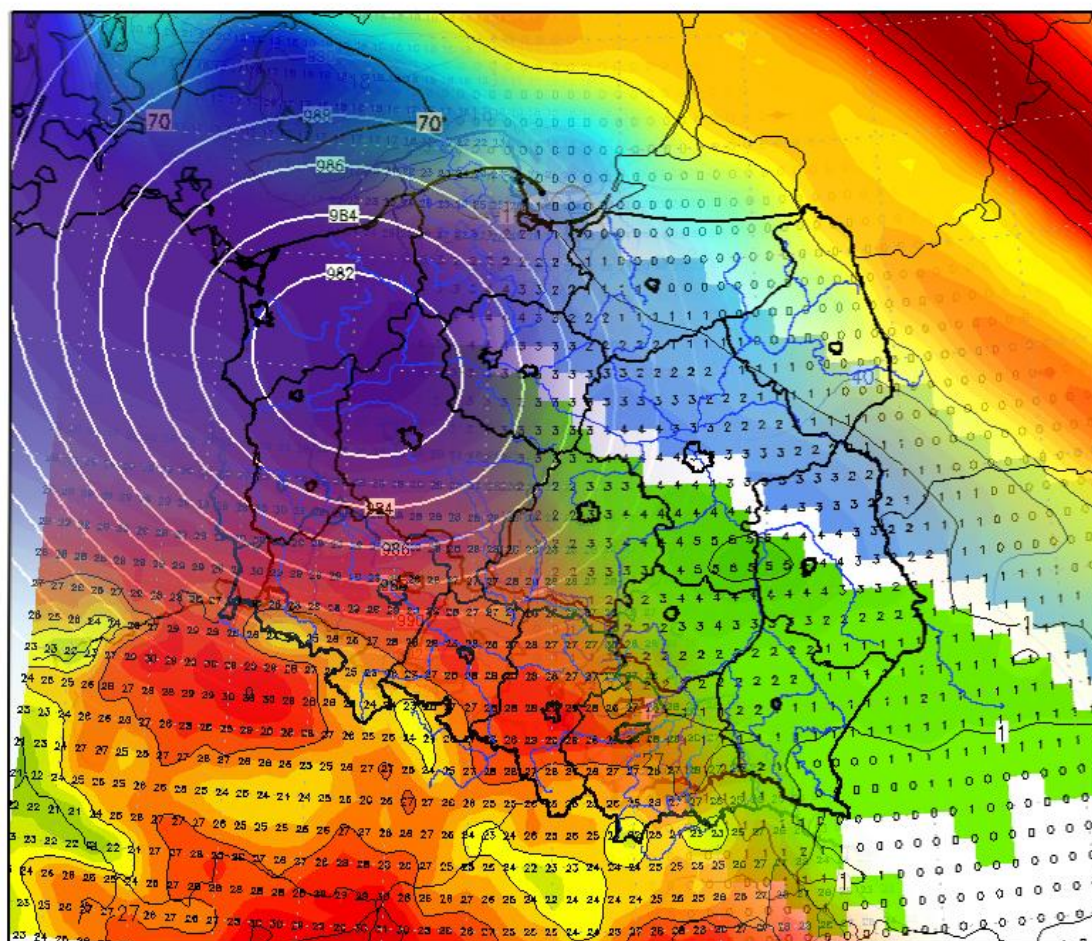




<http://metamodel.pl>

Piotr Djakow 2014, Dane: GFS/NCEP

Autor: Dawid Stepczyński

Grafika & konsultacja: Patryk Matczak

Skywarn Polska – Polscy Łowcy Burz

2020

Spis treści

Wstęp	3
1. Omówienie modelu numerycznego GFS w oparciu o parametry podstawowe.	5
1.1. Termika.....	6
1.2. Wilgotność i opad.....	16
1.3. Zachmurzenie	22
1.4. Wiatr.....	23
2. Omówienie modelu GFS w oparciu o parametry konwekcyjne.....	28
2.1.Chwiejność termodynamiczna	29
2.2. Kinematyka.....	31
2.3. Inne parametry konwekcyjne	33
3. Charakterystyka układów barycznych, interpretacja map synoptycznych i porównanie z wyliczeniami modeli numerycznych.....	36
4. Inne modele numeryczne (UMPL, WRF, ECMWF)	39
Podsumowanie części 1	41
Część 2.....	44
5. Radary meteorologiczne	44
6. Detektory wyładowań atmosferycznych	49
7. Prognozowanie w praktyce	51
Podsumowanie części 2	76

Wstęp

W wyniku postępującego ocieplenia klimatu oraz ciągłych zmian w sferze społeczno-ekonomicznej, z roku na rok globalnie pogoda wywiera coraz większy wpływ na zdrowie i życie człowieka. Dotkliwe susze, a z drugiej strony powodzie, ekstremalne burze niosące trąby powietrzne, niszczące porywy wiatru czy opady dużego gradu dotyczą także kraje Europy Środkowej, w tym Polskę. W związku z tym coraz większą uwagę poświęca się wynikom prognoz numerycznych, szczególnie w środkach społecznego komunikowania. Obliczenia numeryczne wykorzystywane są do wydawania trafnych ostrzeżeń meteorologicznych, które przekazywane dalej we właściwy sposób stanowią dla społeczności cenne źródło informacji o zagrożeniach meteorologicznych. W szczególnych sytuacjach na ich podstawie określone służby oraz instytucje zajmujące się zarządzaniem kryzysowym decydują o zasadach postępowania społeczeństwa, akcjach ratunkowych, a w konsekwencji przyczyniają się do ochrony dobytku i życia ludzkiego. Trafne prognozowanie pogody długoterminowej może przynosić duże korzyści ekonomiczne. „Korzyści te wynikają z oszczędności możliwych do uczynienia w takich dziedzinach jak: rolnictwo, budownictwo, komunikacja lotnicza, drogowa, żegluga, rybołówstwo.”(Woś, 2002). Prognozowanie i bieżąca obserwacja warunków atmosferycznych jest, więc bardzo ważnym czynnikiem oddziałującym na życie społeczeństwa.

W ramach zadań sieci pomiarowo-obserwacyjnej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB), dane ze stacji synoptycznych są systematycznie gromadzone w bazie danych, a następnie udostępniane i wizualizowane, zwykle z wykorzystaniem ogólnodostępnych serwisów internetowych. Na ich podstawie sporządza się tzw. mapy synoptyczne, których analiza jest niezbędna do krótkoterminowego prognozowania pogody. Najważniejszym elementem mapy synoptycznej jest umiejscowienie układów barycznych, a także mas powietrza oraz ich granic, które dostarczają informacji o danych typach cyrkulacji na określonych obszarach. Aby poprawnie odczytywać i interpretować wyniki obliczeń modeli numerycznych oraz analizować mapy synoptyczne konieczna jest znajomość podstawowych procesów i zjawisk atmosferycznych zachodzących w

najniższej warstwie atmosfery - w troposferze. W niniejszym opracowaniu sporządzonym na podstawie *numerycznego modelu prognozowania pogody Global Forecast System (GFS)*¹ omówione zostały cechy różnych parametrów opisujących chwilowy stan fizyczny atmosfery. Zestaw parametrów podzielony został na dwie części: podstawowe oraz te opisujące proces konwekcji, przyczyniające się do występowania gwałtownych zjawisk atmosferycznych. W drugiej części poradnika skupiono się z kolei na praktycznym prognozowaniu pogody. W tym celu przedstawiono różne wersje prognoz na konkretne dni i ich pokrycie ze stanem rzeczywistym.



Burza z wiałem szkwałowym nadchodząca znad Niemiec w stronę Szczecina podczas nocy z 10 na 11 czerwca 2019 roku. Fot. Dawid Stępczyński.

1. Omówienie modelu numerycznego GFS w oparciu o parametry podstawowe.

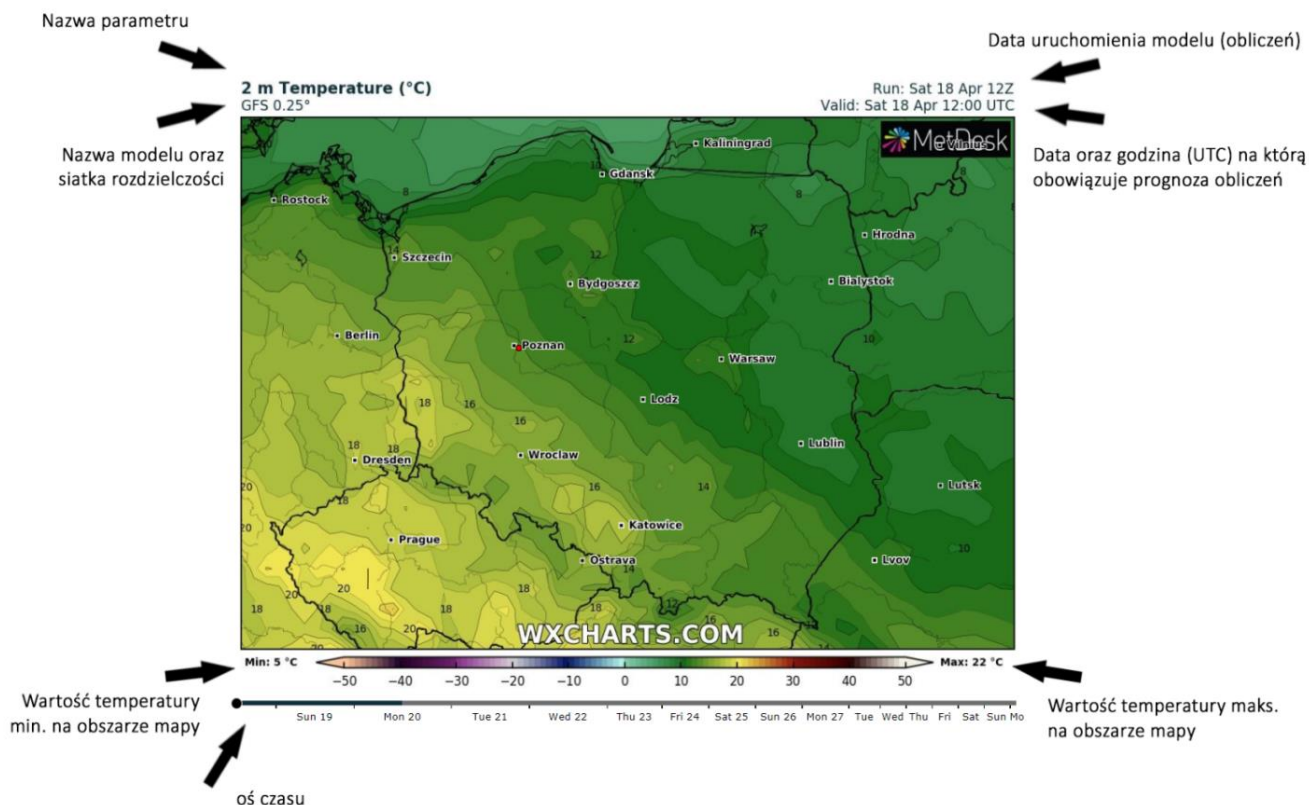
Pierwszym z omawianych modeli numerycznych, a jednocześnie jednym z najczęściej stosowanych jest GFS (*Global Forecast System*)¹. W najprostszym ujęciu, model numeryczny jest programem komputerowym, obliczającym na podstawie pobranych aktualnych warunków brzegowych (m.in. danych synoptycznych, satelitarnych) wartości parametrów meteorologicznych (np. prędkość wiatru, rodzaj i natężenie opadów) w określonym miejscu i czasie.

Analizy prowadzone są przez amerykańskich meteorologów z National Weather Service². Wynik obliczeń jako gotowy produkt jest przetwarzany oraz wizualizowany na stronach internetowych w postaci map, meteogramów³, wykresów itp. Aktualizacja wyliczeń tego modelu następuje 4 razy na dobę (00, 06, 12, 18 UTC). **Zakres obliczeń obejmuje maksymalnie 16 następnych dni (+348 godzin) przy czym dla dalszych terminów (+240-384 godzin) wyliczenia wykonywane są w mniejszej rozdzielczości.** Wyniki analizy obejmują różnego rodzaju parametry meteorologiczne (np. cyrkulacyjne, termiczne, wilgotnościowe, konwekcyjne i inne).

¹ Global Forecast System – globalny model numeryczny obliczający wartości różnych parametrów meteorologicznych. Jest jednym z najpowszechniejszych na świecie.

² National Weather Service – narodowa służba pogodowa, agencja rządu federalnego Stanów Zjednoczonych. Jej głównym zadaniem jest tworzenie prognoz i wydawanie alertów meteorologicznych.

³ Meteogram – zbiór obliczanych wartości parametrów meteorologicznych (np. temperatura powietrza, stopień zachmurzenia, rodzaj i natężenie opadu) dla danego miejsca. Przedstawiany on jest w formie kilku powiązanych ze sobą wykresów (zobacz str. 74).



Ryc. 1. Przykład wizualizacji obliczeń modelu numerycznego GFS o rozdzielczości 0.25 °.

Źródło grafiki: <https://www.wxcharts.com/>

1.1. Termika

Podstawową i najważniejszą wielkością fizyczną opisującą stan atmosfery ziemskiej jest temperatura powietrza. Wpływa ona pośrednio na szereg innych elementów meteorologicznych⁴ kształtujących pogodę. Dla przykładu, im wyższa temperatura masy powietrza, tym większa ilość pary wodnej⁵ może się w niej zmieścić. W troposferze⁶ termika powietrza ulega ciągłym zmianom wskutek nierównomiernego bilansu radiacyjnego Ziemi⁷. Stąd obserwujemy ruchy mas powietrza⁸, zarówno w skali lokalnej jak i globalnej. Temperatura powietrza zmienia się jednak nie tylko w „poziomie”, ale również i w „pionie”, czyli wraz z wysokością w troposferze, co umożliwia powstawanie

⁴ Elementy meteorologiczne – wielkości fizyczne opisujące stan atmosfery w danym miejscu i czasie. W ich skład wchodzi m.in. temperatura i wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne, wiatr, uśłonecznienie.

⁵ Para wodna – jeden ze składników powietrza atmosferycznego. woda występująca w gazowym stanie skupienia. Podlega kondensacji wskutek czego powstają chmury, a niekiedy opady atmosferyczne.

⁶ Troposfera – najniższa warstwa atmosfery, gdzie kształtuje się pogoda oraz klimat.

⁷ Bilans radiacyjny Ziemi – różnica pomiędzy energią przyjmowaną, a traconą przez powierzchnię Ziemi. W zależności od szerokości geograficznej może przyjmować wartości dodatnie, ujemne, bądź zerowe.

⁸ Masa powietrza – rozległy obszar troposfery o podobnych właściwościach termicznych i wilgotnościowych. Jedna masa powietrza jest oddzielna od drugiej strefą frontu atmosferycznego.

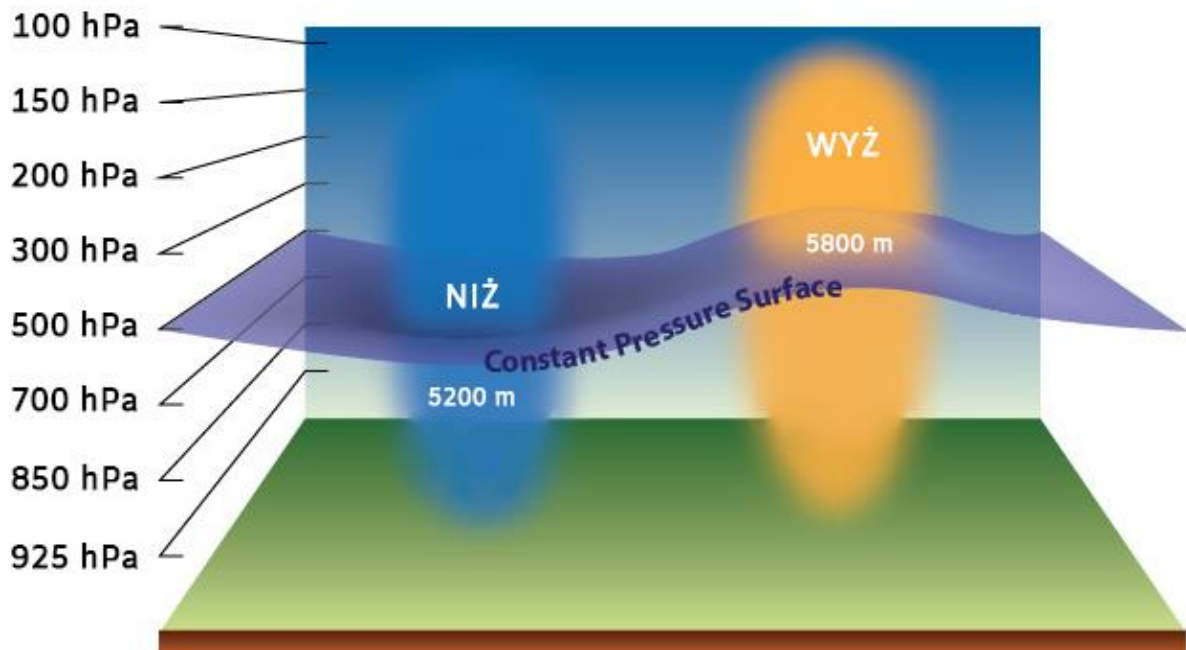
pionowych ruchów powietrza. **Najczęściej unoszące powietrze ochładza się o $0,6^{\circ}\text{C}$ na każde 100m wysokości. W tym przypadku mówi się o tzw. gradiencie wilgotnoadiabaticznym⁹.**

Wraz z wysokością zmniejsza się, również nacisk słupa powietrza na powierzchnię ziemi, a więc maleje ciśnienie atmosferyczne. W pionowym przekroju troposfery zmienia się, więc nie tylko temperatura powietrza, ale także ciśnienie atmosferyczne. Analizowanie relacji tych dwóch elementów jest kluczowe przy ustalaniu aktualnego i prognozowanego stanu atmosfery. **Porównywanie termiki powietrza na różnych powierzchniach izobarycznych pozwala na określenie pionowej równowagi atmosfery (patrz Ryc. 4), a ogólniej na rodzaj masy powietrza występującej w danym miejscu.**

- **Warunki termiczne panujące na powierzchni izobarycznej 850 hPa (ok. 1.5 km nad poziomem gruntu)** są zależne głównie od cyrkulacji powietrza, a nie od rodzaju podłoża atmosferycznego (np. woda, ląd). Najbardziej istotne dla temperatury panującej na tej wysokości stają się uwarunkowania cyrkulacyjne. Odczytywanie warunków termicznych na powierzchni izobarycznej 850 hPa jest ważne przy prognozowaniu mas powietrza napływających nad dany region czy przy ustalaniu położenia frontów atmosferycznych. Na podstawie tych informacji łatwiej przewidywać określoną sytuację synoptyczną. Parametr ten można spotkać m.in. pod nazwą „850 hPa temperature” na stronie <https://www.wxcharts.com/> (patrz niżej).

- **Temperatura powietrza na powierzchni izobarycznej 500 hPa (ok. 5.5 km nad poziomem gruntu)** wskazuje na termikę w środkowej troposferze oraz na umiejscowienie sektorów chłodniejszego i cieplejszego powietrza. **Na tej wysokości w chmurach tworzą się wychłodzone krople wody i kryształki lodu jednocześnie**, które przechodząc przez skomplikowane procesy fizyczne wznoszą się lub opadają przy oddziaływaniu prądów pionowych powietrza. Duży gradient termiczny pomiędzy dolną, a środkową częścią troposfery wskazuje na możliwość wystąpienia silnych prądów pionowych powietrza, przyczyniających się do rozwoju chmur konwekcyjnych (patrz str.34) np. z przelotnymi, intensywnymi opadami atmosferycznymi. Parametr ten można spotkać m.in. na stronie <https://meteomodel.pl/gfs-para/T500/00> pod nazwą „T500” (zobacz Ryc.3).

⁹ Adiabaticzny gradient temperatury – różnica temperatury przypadająca na daną wysokość podczas wznoszenia się lub opadania powietrza. Zmienia się on adiabaticznie, czyli przemieszczająca się pionowo cząstka powietrza nie wymienia ciepła z otoczeniem (zmienia się jedynie jej energia wewnętrzna).

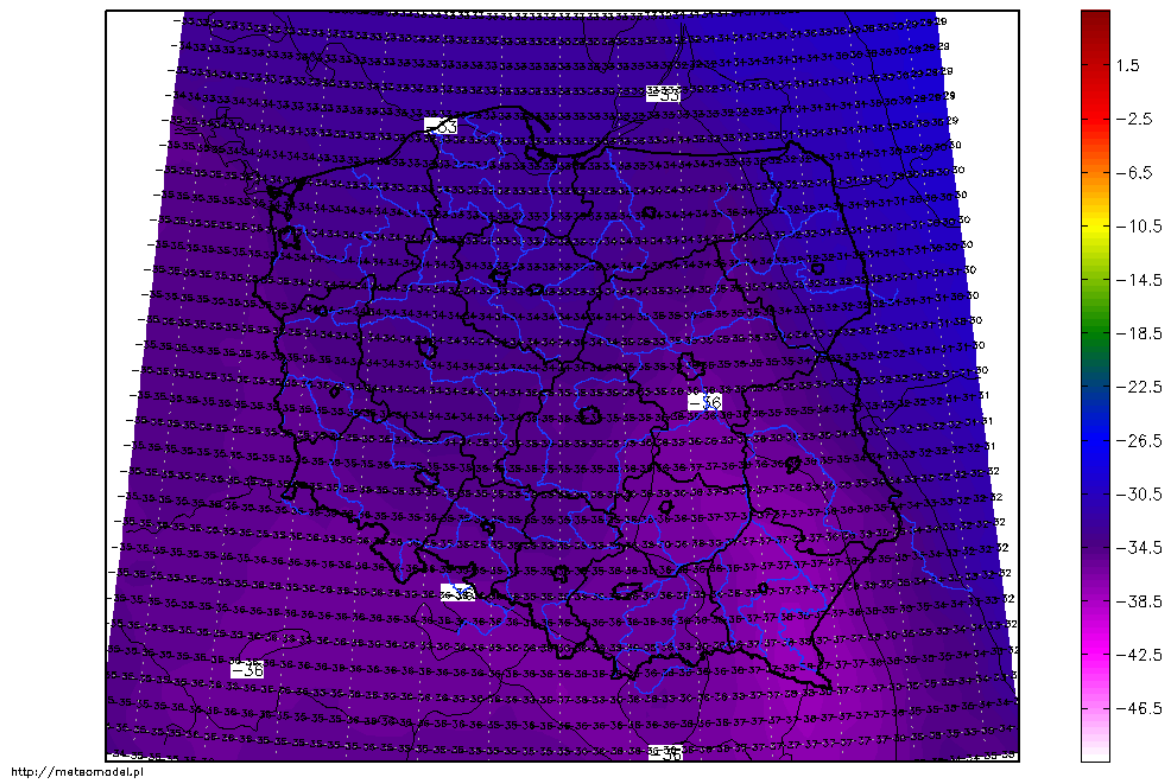


Ryc. 2. Przykład schematu przedstawiającego powierzchnie izobaryczną 500 hPa i jej wysokość, w zależności od układu barycznego (niskiego bądź wysokiego ciśnienia). Źródło:

<https://www.weather.gov/jetstream/common>.

Temperatura powietrza (500hPa, st. C)
Init: 2020-01-28_12:00:00

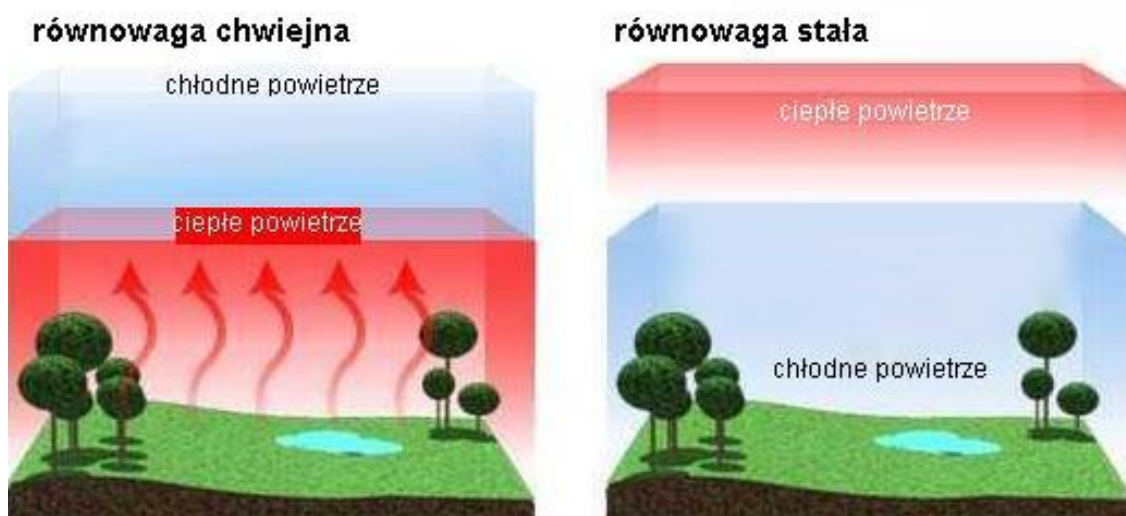
Valid: 09Z29JAN2020



<http://meteomodel.pl>

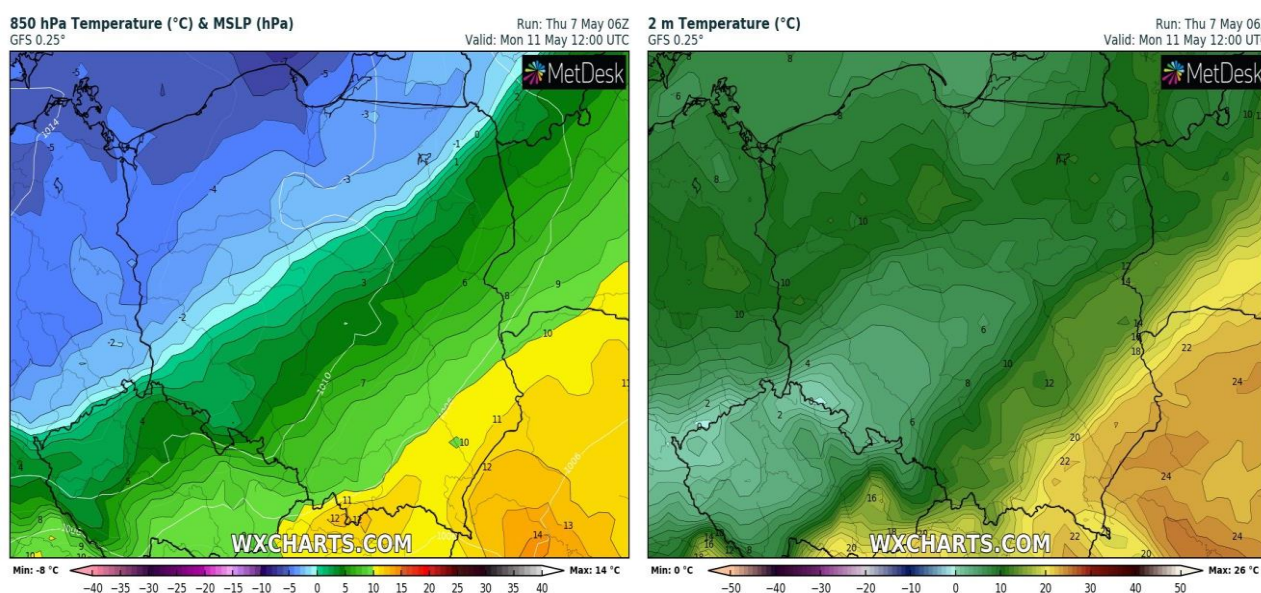
Piotr Djakow 2015, Dane: GFS/NCEP

Ryc. 3. Przykładowa, obliczana przez model GFS temperatura powietrza na powierzchni izobarycznej 500 hPa na 29 stycznia 2020 r., godz. 9 UTC. Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/T500/00>



Ryc. 4. Przykład schematu stanów równowagi pionowej atmosfery. Stan równowagi chwiejnej wiąże się ze wznoszeniem się cieplejszej „porcji” powietrza. W sprzyjających warunkach tworzą się chmury i opady konwekcyjne¹⁰. W równowadze stałej (stabilnej) pojawia się tendencja do hamowania prądów wstępujących¹¹ (co sprzyja pogodzie radiacyjnej¹² z pogodnym niebem). Szczególnym typem równowagi stabilnej jest inwersja temperatury, czyli „odwrócenie” w stosunku do sytuacji zwyczajnej (chłodne powietrze znajduje się niżej niż ciepłe).

Źródło grafiki: http://www.cumulus.nazwa.pl/teoria/wiedza/w_rownowaga.htm



Ryc. 5., Ryc. 6. Obliczana temperatura powietrza [°C] na powierzchni izobarycznej 850 hPa (1.5 km nad powierzchnią gruntu) i na 2 metrach wysokości nad poziomem gruntu na 11 maja 2020 r., godz. 12 UTC. Wynik modelu GFS 0.25°

¹⁰ Opady konwekcyjne – opady atmosferyczne powstające w wyniku procesu konwekcji. Są one przelotne, ale często intensywne. Wypadają z chmur o budowie pionowej (kłębiastych i kłębiasto-deszczowych).

¹¹ Prądy wstępujące - wznoszący prąd pionowy powietrza.

¹² Pogoda radiacyjna powstaje podczas pojawienia się stałej równowagi termicznej, gdy stan fizyczny atmosfery kształtuje się głównie pod wpływem składników bilansu promieniowania (Kożuchowski, 2012). Nocą przyziemna warstwa troposfery ulega silnemu wychłodzeniu (następuje spadek temperatury powietrza), w dzień nagrzaniu przy pogodnym niebie (następuje wzrost temperatury powietrza).

przedstawiał na ten termin umiejscowienie cieplejszej masy powietrza na południowym-wschodzie kraju i chłodniejszej na północnym-zachodzie. Rozdzielać je miał chłodny front atmosferyczny z opadami deszczu. Na obszarze powierzchni frontalnej i spodziewanych opadów, model numeryczny GFS wyliczał niższą temperaturę powietrza na poziomie 2 m n.p.g. niż na północy kraju w chłodniejszej masie powietrza za frontem. Najniższa temperatura na obszarze drugiej mapy widnieje w części południowo-zachodniej Polski, gdzie znajdują się wyżej położony obszary (Sudety). Pierwsza mapa „pomija” natomiast wpływ opadów deszczu i orografii terenu na termikę powietrza. **Najbardziej istotne ponad przyziemną częścią troposfery stają się uwarunkowania cyrkulacyjne.** Źródło grafiki: <http://wxcharts.com/>

- **Temperatura powietrza na wysokości 2m** jest podstawową wielkością określającą stan cieplny powietrza w najniższej warstwie atmosfery. W celu ujednolicenia pomiarów na całym świecie, Światowa Organizacja Meteorologiczna (WMO)¹³ przyjęła wysokość 2 metrów nad poziomem gruntu, jako tą na której dokonywane są pomiary temperatury. Na termikę panującą przy powierzchni ziemi wpływa nie tylko ogólna cyrkulacja atmosfery, ale także lokalne uwarunkowania cyrkulacyjne zależne w największej części od podłoża atmosfery (np. woda, ląd) i rzeźby terenu. **W Polsce najbardziej charakterystyczne lokalne systemy cyrkulacyjne obejmują obszar nadmorski oraz góry i tereny podgórskie.** Parametr ten jest dostępny m.in. na stronie <https://www.wxcharts.com/> pod nazwą „2 m Temperature”(Ryc. 6).

- **Temperatura gruntu (Temperatura powierzchni)** oprócz uwarunkowań cyrkulacyjnych jest zależna od przewodnictwa¹⁴ i pojemności cieplnej¹⁵ głównych składników budujących podłoże. **Parametr ten może okazać się istotny podczas prognozowania temperatury powietrza przy gruncie.** Podczas silnego wypromieniowania ciepła z powierzchni czynnej¹⁶, np. w trakcie bezchmurnej nocy, przy powierzchni ziemi odnotowuje się szybki spadek temperatury. Krótco po wschodzie Słońca często temperatura przy samym gruncie jest niższa niż na wysokości 2 m n.p.g.¹⁷. Natomiast w czasie silnej insolacji (nasłonecznienia) masa powietrza zalegająca przy powierzchni ziemi może być nagrza-

¹³ Światowa Organizacja Meteorologiczna (ang. *WMO – World Meteorological Organization*) - międzynarodowa organizacja, wyspecjalizowana agenda ONZ z siedzibą w Genewie. Jej główne zadania stanowią ujednolicanie metod obserwacyjno-pomiarowych atmosfery oraz współpraca służb meteorologicznych różnych krajów.

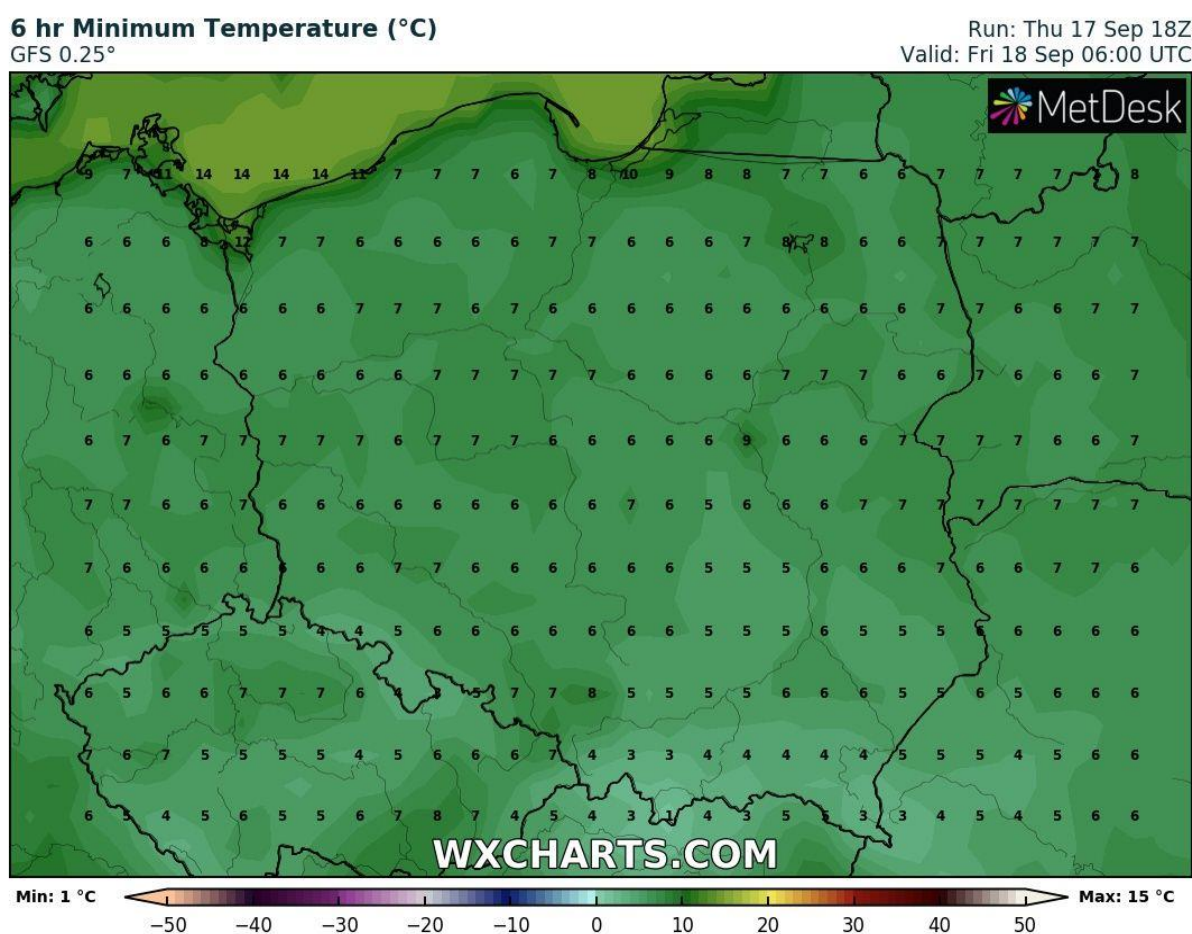
¹⁴ Przewodnictwo cieplne – zdolność określonego ciała do przewodzenia ciepła

¹⁵ Pojemność cieplna - ilość ciepła, która jest potrzebna do zmiany temperatury określonego ciała o 1 stopień.

¹⁶ Powierzchnia czynna - różnego rodzaju podłoże (np. gleba, asfalt, pokrywa śnieżna), które zamieniając energię słoneczną w ciepłą emituje własne promieniowanie.

¹⁷ m n.p.g. – skrót od określenia „metry nad poziomem gruntu”.

na „mocniej” niż na wyższym poziomie troposfery. Należy wspomnieć, że amplituda dobow¹⁸ temperatury powierzchni, podobnie jak przyziemnej warstwy powietrza podczas oddziaływania bezpośredniego promieniowania słonecznego¹⁹ i słonecznej pogody jest większa aniżeli podczas pogody pochmurnej (patrz niżej). Parametr można znaleźć na stronie <http://mapy.meteo.pl/> pod nazwą „temperatura powierzchni” (patrz niżej).

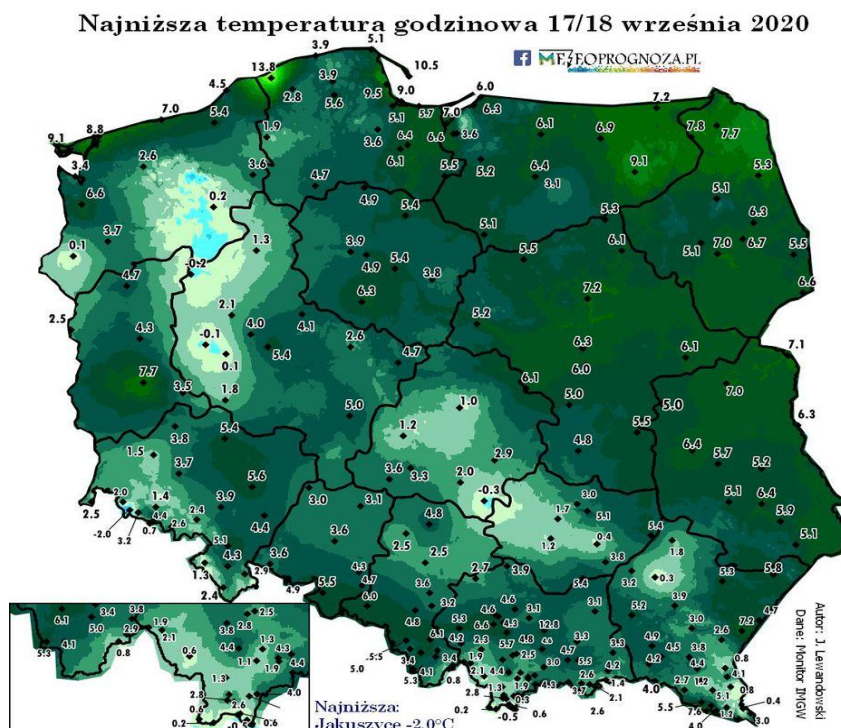


Ryc. 7. Obliczane przez model GFS 0.25° wartości temperatury minimalnej dla wysokości 2m nad poziomem gruntu na noc z 17 na 18 września 2020 roku (z aktualizacji zainicjowanej 17 września o godzinie 18 UTC). Źródło grafiki:

<https://www.wxcharts.com/>

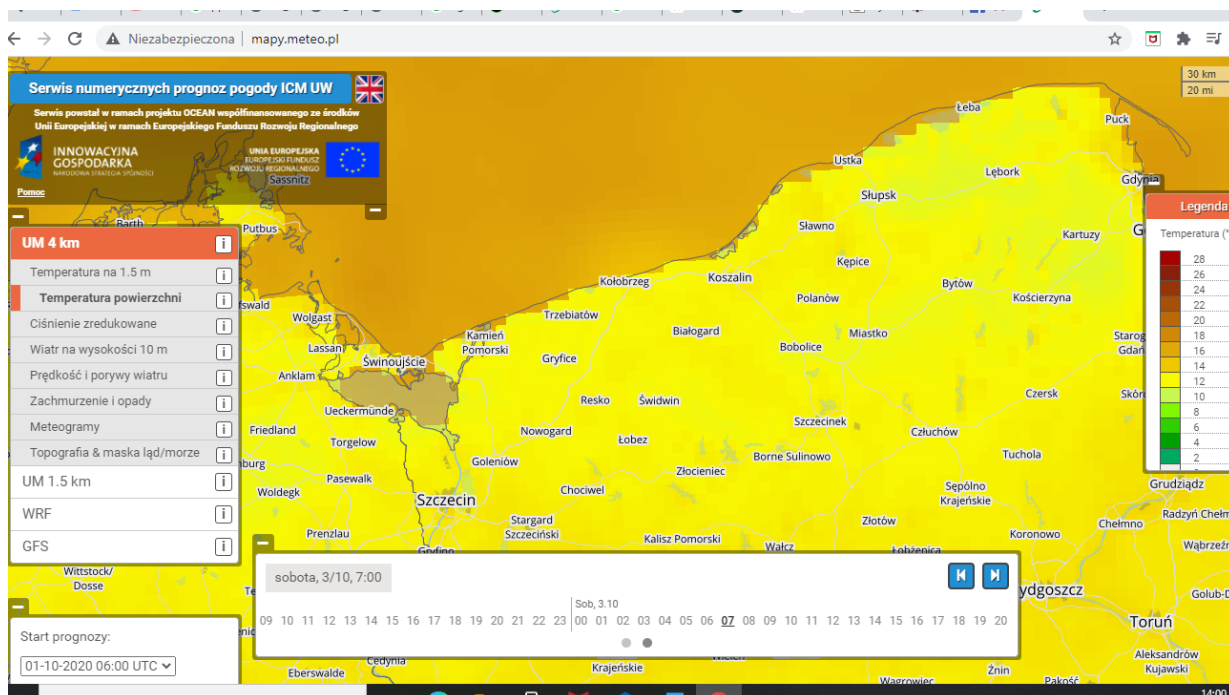
¹⁸ Amplituda dobową temperatury – różnica między maksymalną, a minimalną wartością temperatury powietrza zanotowaną w ciągu doby.

¹⁹ Bezpośrednie promieniowanie słoneczne – promieniowanie dochodzące przez atmosferę do powierzchni ziemi np. w pogodny dzień.



Ryc. 8. Najniższa temperatura godzinowa odnotowana w nocy z 17 na 18 września 2020 r. okazała się na przeważającym obszarze Polski niższa niż wskazywały na to wyliczenia modelu GFS (miejscami nawet o 7-8°C). W kraju panowała wówczas typowa pogoda radiacyjna, kształtująca się pod dominującym wpływem bilansu promieniowania. Przeważało pogodne niebo. W dzień powierzchnia gruntu silnie się nagrzewała, w nocy ochładzała.

Źródło grafiki: Jarosław Lewandowski, <https://meteoprogniza.pl/> na podstawie danych IMGW-PIB.



Ryc. 9. Przykładowa, obliczana przez model UMPL temperatura powierzchni na 3 października 2020r., godz.7 CEST.

Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>

Jak Morze Bałtyckie wpływa na zmiany temperatury w cyklu dobowym i rocznym na obszarze wybrzeża?

Powierzchnię wodną cechuje duża pojemność cieplna²⁰ w porównaniu do powietrza czy „składników” budujących powierzchnię lądową. Przy dostarczeniu tej samej ilości ciepła Morze Bałtyckie nagrzeje się słabiej niż grunt na obszarze lądowym. W związku z tym w cyklu dobowym jak i rocznym wahania temperatury wody są mniejsze niż gruntu. Na tym opiera się działanie lokalnego, nadmorskiego systemu cyrkulacyjnego.

Bryza²¹ najaktywniej zaznacza swój udział wiosną po oddziaływaniu niskiej temperatury powietrza w trakcie zimy. W wyniku oddziaływania coraz wyżej położonego Słońca i związanej z tym silniejszej insolacji ląd zaczyna nagrzewać się coraz mocniej, natomiast powierzchnia morza nie odnotowuje tak dużego wzrostu temperatury. W rezultacie na niewielkim obszarze przy wybrzeżu, na styku dwóch różnych rodzajów podłoża atmosfery notuje się największe w ciągu roku kontrasty termiczne. Wówczas chłodny wiatr znad Morza Bałtyckiego przenosi w głąb lądu masę powietrza o niższej temperaturze. Jednakże wraz z oddaleniem się od zbiornika wodnego wpływ tego wiatru, czyli bryzy staje się coraz mniej wyraźny, aż zanika. Zasięg „ochłodzenia” jest nie tylko zależny od pory roku, ale także od ogólnego kierunku napływu mas powietrza w danym dniu. Adwekcja mas powietrza z kierunku południowego i towarzyszący jej wiatr „od lądu” może skutecznie ograniczać zasięg bryzy, a w niektórych przypadkach na pewien czas całkowicie ją wyeliminować. Napływ ciepłego powietrza polarnego kontynentalnego nad wybrzeże i towarzyszący mu wiatr północno-wschodni (przepływający nad powierzchnią Morza Bałtyckiego) może doprowadzić do zwiększenia intensywności i zasięgu bryzy. W niektórych dniach różnica temperatury powietrza na obszarze nadmorskim w zasięgu kilkunastu kilometrów może sięgać nawet kilkunastu stopni Celsjusza.

Warunki atmosferyczne w miarę oddalania się i zbliżania do zbiornika wodnego potrafią zmieniać się bardzo gwałtownie. Modele numeryczne o mniejszej rozdzielczości (np. GFS) nie szacują dobrze zmienności temperatury powietrza na obszarze kilku, kilkunastu kilometrów. **Do tego celu bardziej preferowane jest wykorzystanie modeli numerycznych o większej rozdzielczości (np. UMPL opisany niżej).**

²⁰ Pojemność cieplna - ilość ciepła, która jest potrzebna do zmiany temperatury określonego ciała o 1 stopień.

²¹ Bryza – lokalny wiatr występujący m.in. w strefie wybrzeża morskiego. Powstaje w wyniku nierównomiernego nagrzewania się różnego rodzaju podłoża atmosfery.

Dzięki opisanym na początku właściwościach fizycznych zbiorników wodnych spadki i wzrosty temperatury powietrza średnio w ciągu roku na obszarze wybrzeża są mniejsze, łagodniejsze niż w głębi lądu. Latem średnia temperatura powietrza w pasie nadmorskim jest niższa niż w głębi lądu, natomiast zimą na ogół jest cieplej na wybrzeżu niż w innych regionach Polski. Warto o tym pamiętać w trakcie interpretacji wyników prognoz modeli numerycznych.

Jak warunki orograficzne wpływają na temperaturę powietrza, a następnie na szereg innych elementów meteorologicznych ?

Wysokość nad poziomem morza ma olbrzymie znaczenie dla panujących w danym miejscu warunków atmosferycznych. Podstawowym elementem meteorologicznym zmieniającym się wraz z wysokością jest temperatura powietrza. Urozmaicona rzeźba terenu, a w szczególności występowanie pasm górskich sprzyja powstawaniu „zakłóceń” dla ogólnej cyrkulacji atmosferycznej i związanych z nią wielkoskalowych ruchów mas powietrza²². Wartości różnych elementów meteorologicznych na obszarze kilku, kilkunastu-kilometrów mogą wówczas zmieniać się bardzo gwałtownie. Przydatne do określania chwilowego stanu atmosfery na obszarze górskim są wyliczenia numeryczne z siatką pomiarową, o większej rozdzielczości (np. UMPL). Modele globalne o większych wymiarach siatki gorzej oszacują zmianę pogody w górach ze względu na „wypłaszczanie” w modelu gór i wzniesień.

Góry w południowych krańcach Polski są ułożone w przybliżeniu równoleżnikowo. Gdy ogólny prąd powietrza przepływa prostopadle do pasma górskiego (np. z południa) zaczyna wznosić się po stoku dowietrznym wymuszając ruchy wstępujące powietrza. Pojawia się konwekcja orograficzna²³, po osiągnięciu poziomu kondensacji i stanu nasycenia powietrze ochładza się wilgotnoadiabatycznie, po czym rozbudowują się chmury i powstają opady atmosferyczne. Po stoku zawietrznym powietrze opada gwałtownie w stronę dolin, dzięki czemu staje się suchsze i cieplejsze. „Ześlizgiwaniu się” towarzyszy **ciepły, suchy, porywisty i lokalny wiatr**, zwany fenem (w Tatrach halnym). Cechuje go duże zróżnicowanie prędkości na względnie niewielkich obszarach. Przykładowo w tym samym czasie wiatr w wysokich partiach gór może być o ponad 100 km/h silniejszy niż w kotlinach. To właśnie na sta-

²² Wielkoskalowe ruchy mas powietrza – związane są z ogólnym przepływem powietrza w troposferze, bez oddziaływania na nie cyrkulacji lokalnej (np. wiatr dolinny i górski, bryza).

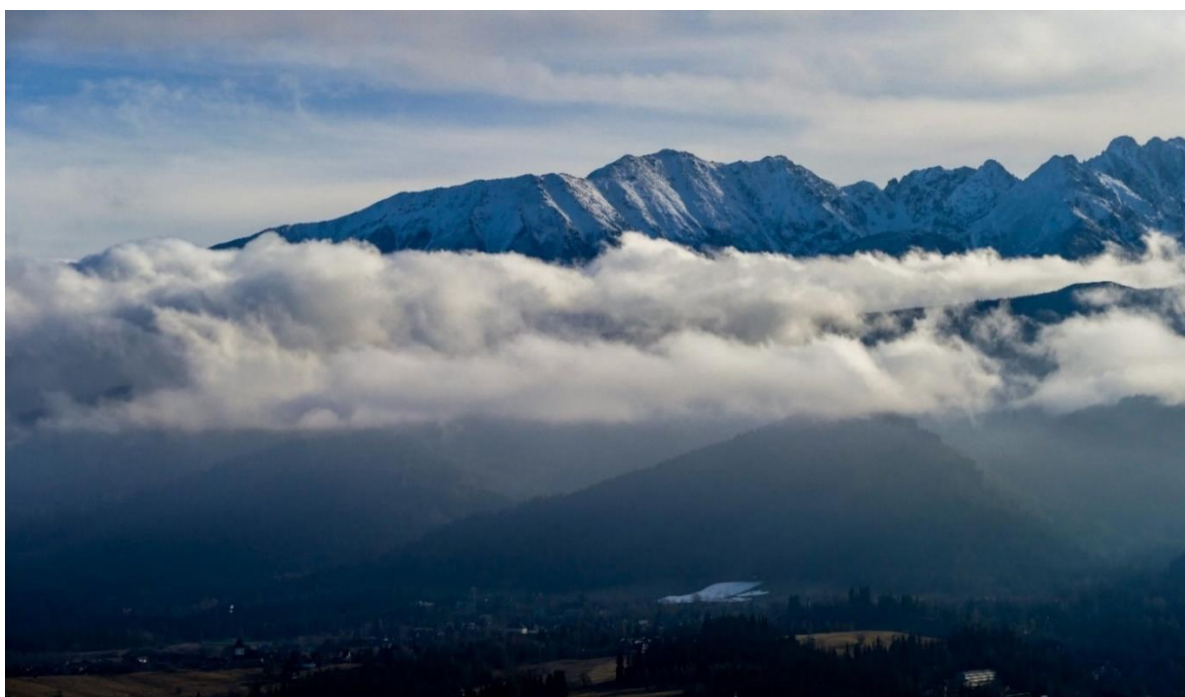
²³ Konwekcja orograficzna – konwekcja, której rozwój jest wspomagany przez „wymuszone” wznoszenie się powietrza nad grzbietem górskim.

cjach meteorologicznych zlokalizowanych na szczytach górskich notuje się najwyższe w Polsce średnie prędkości jak i porywy wiatru.

Halny może nieść za sobą duże szkody w drzewostanie, a czasami także docierając nad obszary zabudowane stanowi **poważne zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego**. Jest to jeden z powodów, dla czego warto sprawdzać wyniki prognoz pogody wybierając się w góry. Omawiany lokalny wiatr prowadzi do gwałtownego ocieplenia, co zimą przyczyniać się może do szybkiego topnienia pokrywy śnieżnej. Powietrze staje się także suchsze i nie notuje się opadów atmosferycznych.

Podczas występowania chwiejnej równowagi atmosfery dodatkowa obecność pasma górskiego może sprzyjać gwałtowniejszemu rozwojowi chmur o budowie pionowej i powstawaniu burz z gwałtownymi, konwekcyjnymi opadami deszczu. W skali kraju to właśnie w Tatrach notuje się najwyższą sumę roczną opadów deszczu.

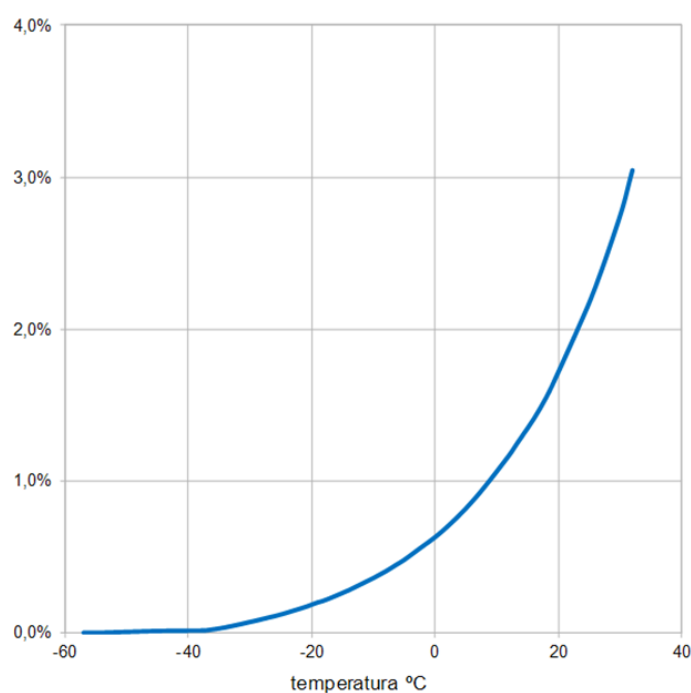
Podczas pogody typowo radiacyjnej ze stabilną (stałą) równowagą termiczną atmosfery, w kotlinach podgórskich odnotowuje się szczególnie duże wartości dobowej amplitudy temperatury powietrza. **Wyliczenia modeli numerycznych dla obszarów o bardzo urozmaiconej rzeźbie terenu niekoniecznie dobrze oszacują zmienność dobową temperatury powietrza**. W ciągu pogodnej nocy następuje szybkie wypromieniowanie ciepła z podłoża, co szczególnie uwidacznia się w zagłębieniach terenu. Powstają wówczas tzw. zastoiska chłodu. Na szczytach górskich choć panuje średnio niższa temperatura w cyklu dobowym i rocznym, jest ona bardziej „wyrównana”.



Ryc. 10. Niskie zachmurzenie obserwowane z Gubałówki. Fot. Dawid Stępczyński

1.2. Wilgotność i opad

Wilgotność powietrza jest miarą zawartości pary wodnej w powietrzu atmosferycznym. „Para wodna, znajdująca się w powietrzu wpływa na właściwości fizyczne i decyduje o wielu istotnych procesach, zachodzących w atmosferze: wymianie ciepła, adiabatycznych zmianach temperatury, powstawaniu chmur i opadów.”(Kozuchowski, 2012). Źródłem wilgoci dla atmosfery jest ewapotranspiracja, czyli parowanie z powierzchni wodnej, gruntu i roślin. Prognozowana wielkość nasycenia powietrza parą wodną w całym przekroju troposfery w pewnym stopniu ilustruje warunki do powstawania produktów kondensacji, jakimi są chmury i opady atmosferyczne. Należy przypomnieć o tym, że cieplejsze powietrze jest w stanie pomieścić więcej pary wodnej, niż powietrze chłodniejsze.

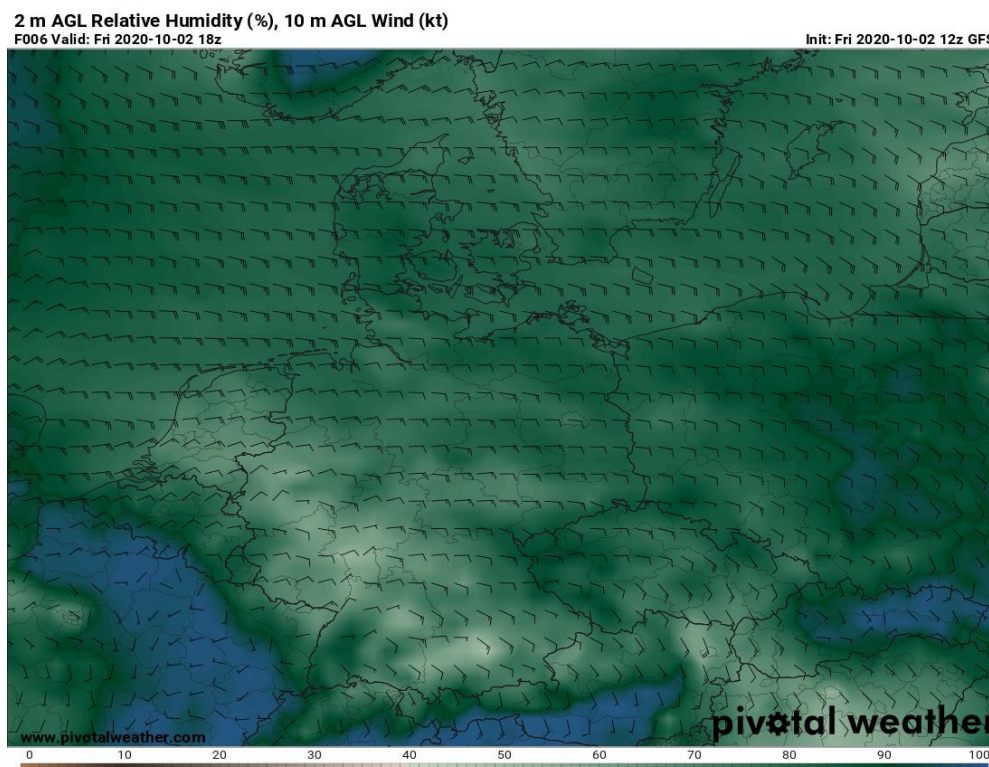


Ryc. 11. Poziom nasycenia powietrza parą wodną w zależności od temperatury.

Źródło: <https://klimatziemi.pl/obecnosci-i-przyszlosc-pary-wodnej-w-obszarach-najbardziej-wilgotnych-i-najbardziej-suchych-na-ziemi/> na podstawie <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dewpoint.jpg>.

- **Wilgotność względna na wysokości 2 metrów** opisuje procentowy udział aktualnego ciśnienia pary wodnej do możliwie maksymalnego w danej temperaturze. Mniejszy udział wilgotności

względnej oznacza, iż powietrze jest bardziej suche oraz gęstsze. Natomiast wyższy udział tego elementu meteorologicznego świadczy o tym, że w przyziemnej warstwie troposfery znajduje się więcej pary wodnej. Parametr ten można spotkać pod nazwą „2 m AGL Relative Humidity” na stronie <https://www.pivotalweather.com/model.php>.



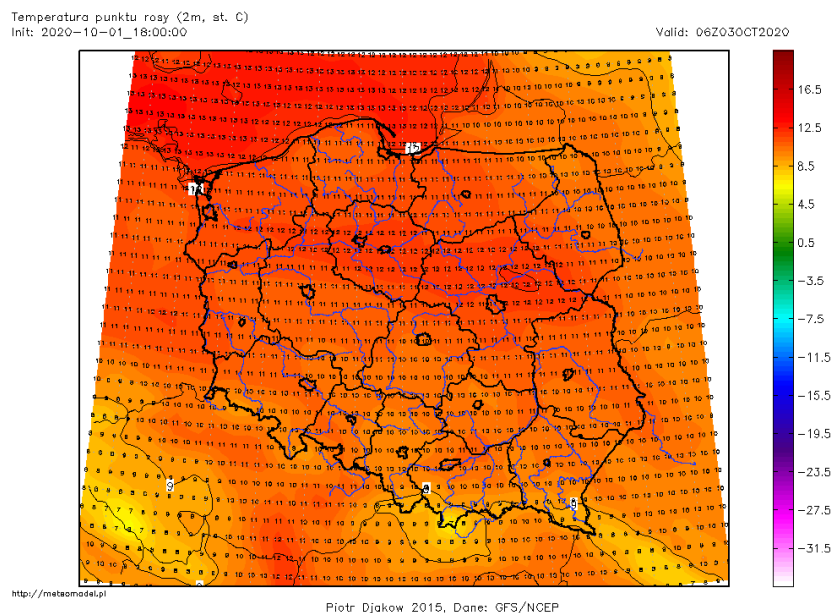
Ryc. 12. Obliczana przez model GFS wilgotność względna na wysokości 2m dla godz. 18 UTC, 2 października 2020r. Źródło: <https://www.pivotalweather.com/model.php>.

Wilgotność względna powietrza w wyższych warstwach troposfery może dostarczać informacji o warunkach do powstania różnych rodzajów chmur, szczególnie tych o budowie konwekcyjnej powodujących najgwałtowniejsze opady atmosferyczne. Rozwój zachmurzenia o dużej rozciągłości pionowej przy niższej wilgotności w częściowo dolnej i środkowej troposferze (np. 850 hPa, 500 hPa) może zostać powstrzymany, gdyż prądy wznoszące powietrza mogą zostać „zahamowane” przez zalegającą wyżej suchą, gęstszą masę powietrza, często o stabilnej stratyfikacji termicznej. To czy konwekcja się rozwinie jest zależne od miąższości suchszego, stabilnego powietrza i towarzyszącej mu inwersji temperatury. W niektórych przypadkach napływ suchego powietrza do częściowo dolnej i środkowej troposfery może nawet przyczynić się do rozrostu chmury konwekcyjnej. Mechanizm powstawania konwekcji termicznej został opisany w drugim rozdziale (patrz niżej).

Jeśli równowaga atmosfery jest stała, najwyższa wilgotność powietrza w przebiegu dobowym występuje rano. Niekiedy pojawia się wtedy przyziemna inwersja temperatury powietrza i tworzy się

mgła lub zachmurzenie warstwowe piętra niskiego (chmury *Stratus*). W ciągu dnia zawartość pary wodnej spada osiągając minimum popołudniu, a wieczorem znów wzrasta. Jeśli równowaga atmosfery jest chwiejna, wtedy wskutek rozwoju chmur i opadów konwekcyjnych może zostać odnotowany ponowny wzrost wilgotności powietrza. Przebieg ten jest jednak często modyfikowany poprzez oddziaływujące w różnych porach doby przy wymianie mas powietrza fronty atmosferyczne. **Generalnie jednak przyjmujemy, że wraz ze wzrostem temperatury wilgotność powietrza spada. Analogicznie wraz ze spadkiem temperatury notuje się wzrastającą wilgotność powietrza.**

- **Temperatura punktu rosy (punkt rosy)** jest ściśle powiązana z wilgotnością powietrza w przyziemnej warstwie troposfery. Odpowiada ona temperaturze w której powietrze staje się w pełni nasycone parą wodną (wilgotność względna wynosi wtedy 100 %). Jeśli powietrze przy powierzchni ziemi nie jest nasycone parą wodną i wznosi się adiabatycznie, jego temperatura spada i wraz z wysokością notuje się wzrost wilgotności względnej (w niższej temperaturze potrzebna jest mniejsza ilość pary wodnej do osiągnięcia stanu nasycenia). **Poziom w którym rozpoczyna się skraplanie pary wodnej jest nazywane poziomem kondensacji. Odpowiada w przybliżeniu podstawie chmur i tym samym na tej wysokości osiągnąony jest punkt rosy.**



Ryc. 13. Przykład obliczanej przez model GFS temperatury punktu rosy na godz. 6 UTC, 3 października 2020r.

Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/D2M/00>.

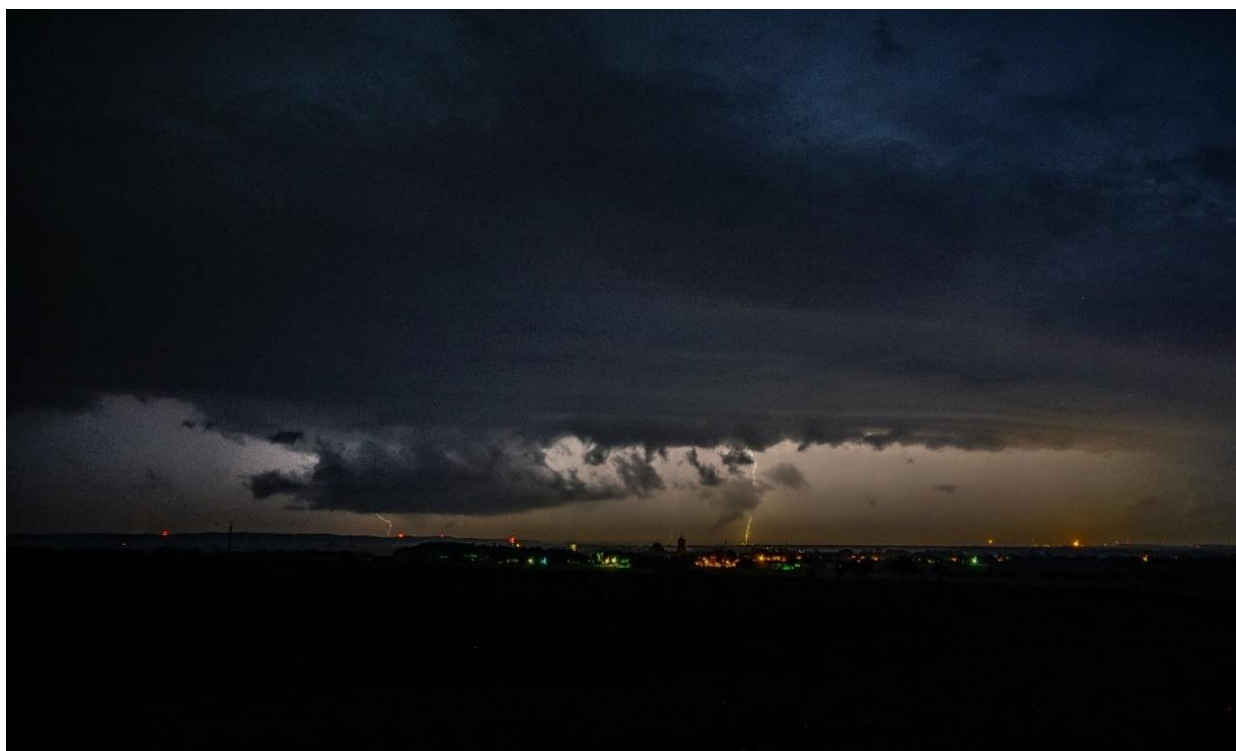
Gdy temperatura powietrza w przyziemnej warstwie troposfery spada poniżej punktu rosy rozwija się mgła. W rezultacie podstawa chmur znajduje się bardzo nisko (styka się z podłożem), a

pozioma widzialność jest mocno ograniczona. Ogólnie rzecz biorąc mgła powstaje w stabilnym (stałym) stanie równowagi atmosfery. Występuje wówczas przyziemna inwersja temperatury powietrza i hamowane są wstępujące prądy pionowe powietrza. Najczęściej obecność mgły powiązana jest z niewielkimi prędkościami wiatru i osiadaniem mas powietrza, co ma często miejsce w obrębie wyżu (zobacz str. 39). Wtedy zwykle mówimy o tzw. mgle radiacyjnej. Są jeszcze inne rodzaje mgły, które powstają w wyniku napływu cieplejszego powietrza nad chłodne podłoże, ale generalnie ich obecność wiąże się ze stabilną stratyfikacją termiczną w przyziemnej warstwie troposfery. Wtedy nie są rozwijane silnie prądy pionowe powietrza, nie powstaje konwekcja, ani gwałtowne opady. Opisany parametr można spotkać na stronie <https://meteomodel.pl/gfs-para/D2M/00> pod nazwą „D2M”.

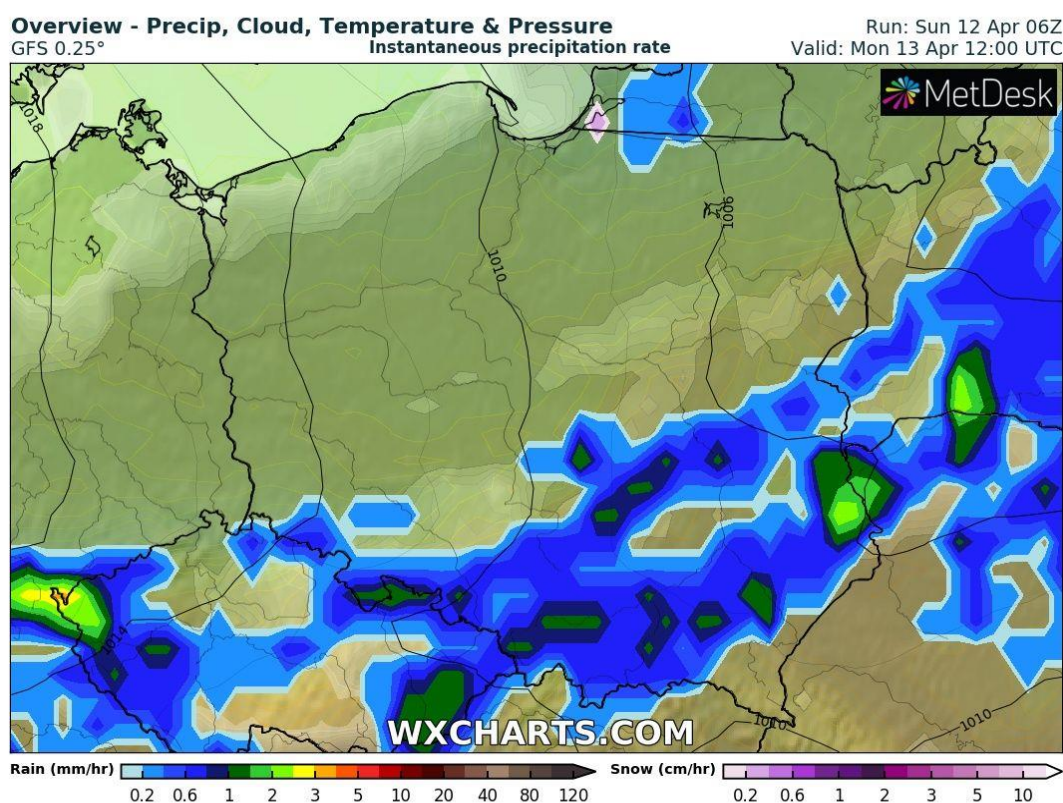
Do analizy aktualnej temperatury i wilgotności powietrza w zależności od wysokości, czyli relacji tych głównych dwóch elementów meteorologicznych w pionowym przekroju troposfery służą **sondaże aerologiczne**. Na ich podstawie możliwe jest, także określenie pionowej zmienności ciśnienia atmosferycznego oraz uskoków wiatru (patrz str.64).

- **Rodzaj i natężenie opadu** - gdy krople wody urosną do większych rozmiarów, takich w których prądy powietrza nie są w stanie już ich utrzymywać, powstają opady atmosferyczne. Opady ze względu na ich charakter podzielić możemy na dwie grupy: **przelotne oraz ciągłe**. Te pierwsze obejmują zazwyczaj mniejszy obszar, trwają krócej i są intensywniejsze (często powstają w wyniku konwekcji). „Im krótszy czas trwania opadu, tym większe może być jego natężenie.”(Kozuchowski, 2011). Deszcz czy śnieg o charakterze ciągłym obejmuje większy obszar, trwa dłużej i jest stosunkowo słabszy niż opad przelotny. Prognozowana wielkość opisanych wyżej hydrometeorów²⁴ przedstawiana jest w różnych jednostkach w zależności od rodzaju opadu. W wynikach obliczeń numerycznych deszcz najczęściej wizualizowany jest w milimetrach (czyli litrach przypadających na metr kwadratowy powierzchni), a śnieg w centymetrach. Parametr ten można spotkać na stronie <https://www.wxcharts.com/> pod nazwą „Overview” lub „Niederschlagsform” na <https://www.wetterzentrale.de/> (zobacz ryc. 15).

²⁴ Hydrometeory – cząstki wody bądź drobiny lodu występujące w atmosferze. Są to m.in. deszcz, mżawka, śnieg, grad, krupa śnieżna.

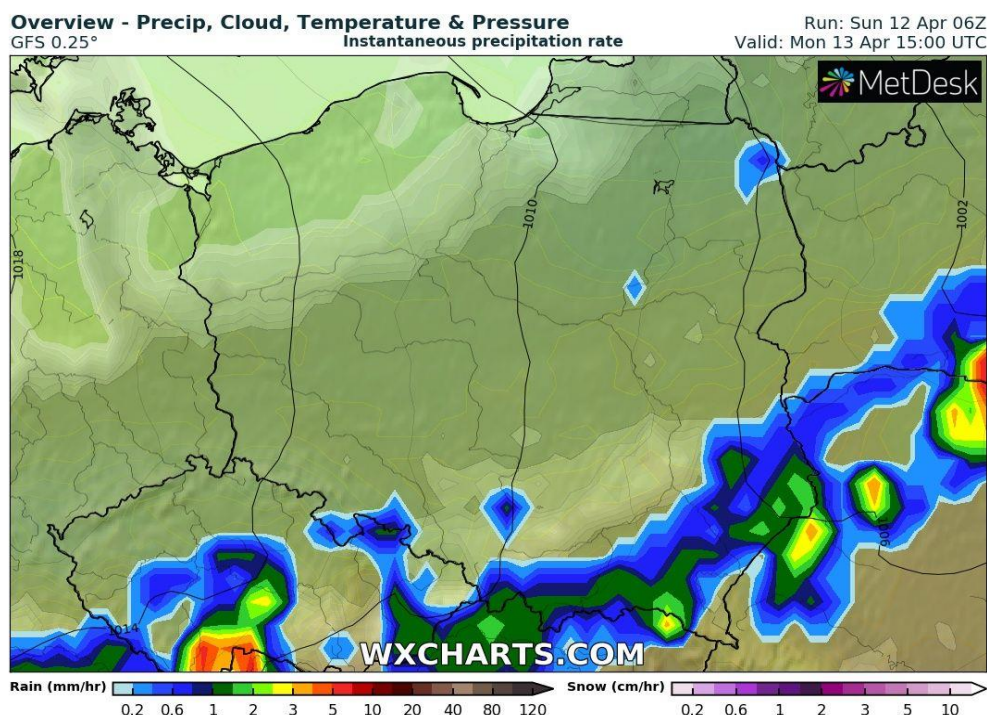


Ryc. 14. Burza obserwowana w okolicy Gartz (Oder) w nocy z 10 na 11 czerwca 2019 roku. Fot. Dawid Stępczyński



Ryc. 15. Obliczenia modelu numerycznego GFS 0.25° z godz. 06 UTC dnia 12 kwietnia 2020 r. przedstawiające rodzaj i natężenie opadu na godz. 12 UTC 13 kwietnia 2020 roku. Według tych wyliczeń w południowej i częściowo centralnej części Polski wystąpić miały opady deszczu.

Źródło: <https://www.wxcharts.com/>



Ryc. 16. Ta sama grafika dla obliczeń na godz. 15:00 UTC. Strefa opadu miała przesunąć się „bardziej” na południe, zwiększając miejscami swoją intensywność (szczególnie w regionach górskich i podgórskich).

Źródło: <https://www.wxcharts.com/>.

- **Suma opadu** – parametr podobny do poprzedniego, przedstawia prognozowaną sumę różnego rodzaju opadów w odmiennych jednostkach czasu np. 3 godzinnej jak „Niederschlag” na <https://www.wetterzentrale.de/> czy 24-godzinnej jak „Precipitation-24hr” na <https://www.wxcharts.com/> (zobacz str. 51).

Opad nie jest trwały, nie występuje na całej kuli ziemskiej nieprzerwanie tak jak temperatura powietrza, wiatr czy ciśnienie atmosferyczne. Przewidywanie wielkości hydrometeorów dla określonego obszaru jest, więc problematycznym zagadnieniem z jakim mierzą się synoptycy. „Wyliczenie” sumy i intensywności opadu jest dużo trudniejsze, niż prognozowanie temperatury powietrza, prędkości i kierunku wiatru czy wartości ciśnienia atmosferycznego. Jednakże czasem nad dany region przemieszczania się rozległa, strefy wielkoskalowego deszczu o słabym natężeniu. Określenie wielkości i czasu trwania opadu dla omawianego miejsca jest wówczas łatwiejsze niż podczas rozwoju konwekcji wewnątrz jednorodnej masy powietrza z przelotnym lokalnym deszczem czy niekiedy śniegiem, gradem lub krupą śnieżną²⁵.

²⁵ Krupa śnieżna – opad niewielkich (do 0,5 cm średnicy) ziaren lodowych. Padają przelotnie z chmur kłębiasto-deszczowych (*Cumulonimbus*).

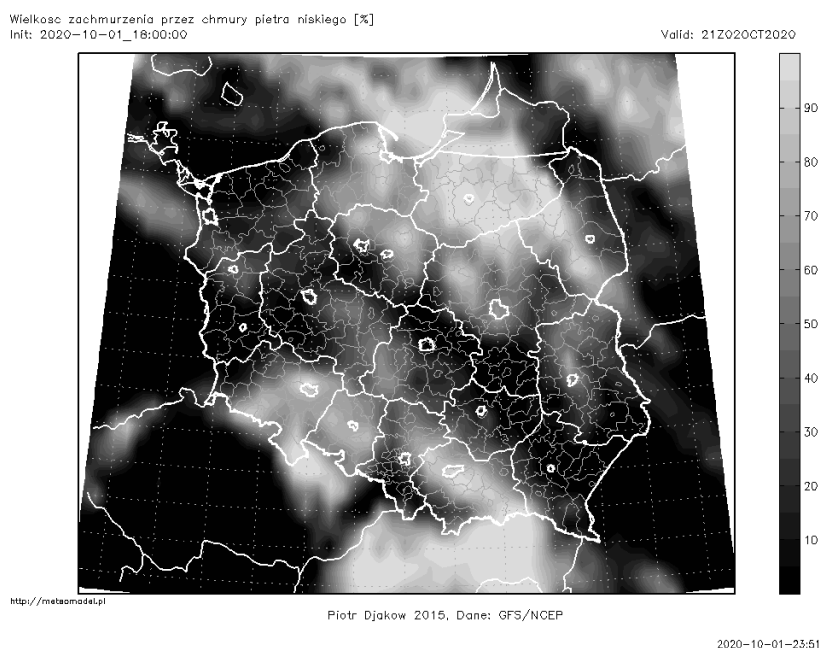
1.3. Zachmurzenie

Zachmurzenie to stopień w jakim niebo pokryte jest przez wszystkie widoczne na nim chmury. Jego wielkość wyraża się w 9-stopniowej skali i określa w tzw. oktantach. Podczas braku chmur zachmurzenie określone jest jako 0/8, natomiast analogicznie przy całkowitym pokryciu nieba przez chmury wskazuje się na 8/8 oktantów.

Modele numeryczne ponadto uwzględniają podstawowy podział na rodziny (piętra). W szerokościach umiarkowanych podział pięter wygląda następująco:

- chmury piętra niskiego (od 0 do 2 km);
- chmury piętra średniego (od 2 do 7 km);
- chmury piętra wysokiego (od 5 do 13 km).

Modele numeryczne przedstawiają wyniki prognoz wielkości zachmurzenia określonych pięter w skali procentowej (od 0 do 100 %). W wyliczeniach GFS parametry te można znaleźć m.in. na stronie <https://meteomodel.pl/gfs-para/CL/00>. Należy wspomnieć o tym, że na tej podstawie ciężko jest prognozować wielkość chmur konwekcyjnych, rozciągających się niekiedy od niskiego, aż do wysokiego piętra dających najgwałtowniejsze opady, o największym natężeniu spośród wszystkich rodzajów chmur. Do tego celu posłużyć nam mogą wyliczenia modelu UMPL i zachmurzenie ogólne prezentowane wraz z opadem m.in. na <http://mapy.meteo.pl/> (zobacz str. 55).



Ryc. 17. Przykład wizualizacji obliczeń wielkości zachmurzenia przez chmury piętra niskiego modelu GFS 0.25°.

Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/CL/00>.

Jak zachmurzenie wpływa na warunki termiczne w przyziemnej warstwie troposfery?

Warto przytoczyć związek usłonecznienia z rozkładem dobowym temperatury powietrza. Usłonecznienie jest czasem, kiedy tarcza słoneczna nie jest zasłonięta przez chmury. Podczas bezchmurnego dnia amplituda dobową temperatury powietrza (różnica między najwyższą a najniższą wartością) będzie większa, aniżeli podczas dnia pochmurnego. Widoczny jest wówczas wpływ niewielkiego przewodnictwa cieplnego i małej pojemności cieplnej gruntu, który w czasie oddziaływania silnego nasłonecznienia szybko się nagrzewa, a podczas nocy ochładza. Modele numeryczne wskutek niedoszacowania powyższych czynników przedstawiają w swoich wynikach obliczeń temperaturę prognozowaną inną niż rzeczywista. **Podczas pogodnego dnia maksymalna temperatura powietrza bywa przez wyliczenia często zaniżana, natomiast temperatura minimalna zawyżana.**

W rozkładzie rocznym natomiast duże znaczenie dla wahań temperatury ma insolacja, czyli natężenie promieniowania słonecznego na jednostkę powierzchni, o wielkości zależnej od wysokości słońca nad horyzontem. Latem amplitudy dobowe temperatury są większe, aniżeli w porze zimowej.

1.4. Wiatr

Wiatr jest kolejnym, ale równie ważnym czynnikiem meteorologicznym kształtującym pogodę. Jest to element, który występuje **nieprzerwanie** na całej kuli ziemskiej o określonej prędkości i kierunku, o przeważającej składowej względem powierzchni ziemi. Jak powstaje wiatr? – najprościej mówiąc, wywołwany jest przez różnicę ciśnień w atmosferze. Każda nawet niewielka różnica siły, pomiędzy tą z jaką słup powietrza naciska na obszar A, a tą z jaką naciska na obszar B owocuje pojawieniem się przepływu powietrza. Im większa jest różnica ciśnienia pomiędzy obszarem A i B, tym silniejszy będzie wiatr.

Prognozowanie wiatru nie należy do najprostszych zagadnień. Do analizy potrzebnych jest wiele składników, takich jak chociażby **wspomniane wcześniej ciśnienie atmosferyczne (rozkład pola barycznego), temperatura powietrza (rozkład temperatury) a także prawdopodobieństwo rozwoju konwekcji**. Przepływ powietrza występuje na każdej z wysokości w troposferze. Z reguły w wyższych partiach jest on silniejszy z racji braku czynników hamujących takich jak np. tarcie przy powierzchni ziemi, brak przeszkód w postaci zabudowy. Ważną rzeczą, o której należy również pamiętać jest kie-

runek wiatru. W meteorologii używając pojęcia wiatr północny mówimy o tym, że wiatr wieje z kierunku północnego. Podając nazwę kierunku pamiętajmy, że mówimy o tym skąd wieje wiatr, a nie dokąd prowadzi.

- **Wiatr na wysokości 10 m n.p.g.**

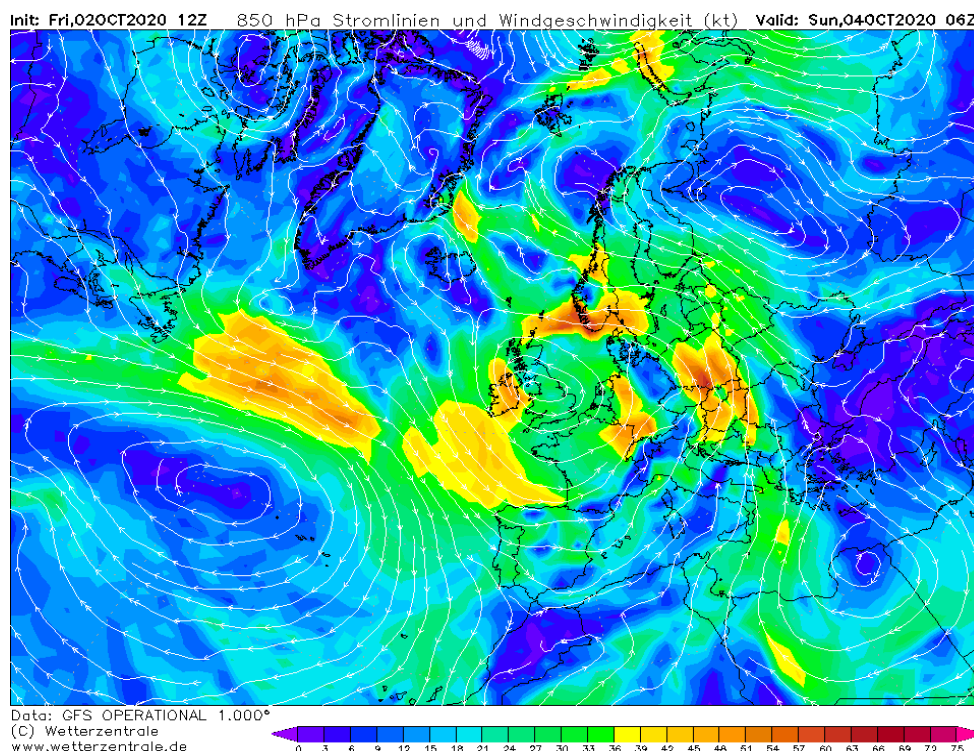
Parametr przedstawia rozkład średniej prędkości i kierunku wiatru na wysokości 10 m n.p.g., a więc tej, w jakiej podawana jest prędkość wiatru na większości stacji meteorologicznych. Jest to kluczowy parametr, ponieważ przedstawia on najbardziej rzeczywisty i zbliżony obraz tego, co odczuwamy na co dzień.

Warto podkreślić, iż przedstawiana jest tu średnia prędkość wiatru, a więc nie uwzględnia ona możliwych chwilowych, ale gwałtownych porywów wiatru. Parametr ten spotyka się m.in. pod nazwą „**10 m Wind**” na <https://www.wxcharts.com/> oraz na <https://www.wetterzentrale.de/> (zobacz niżej).

- **Wiatr na wysokości 850 i 925 hPa.**

Kolejne parametry przedstawiają prędkość i kierunek wiatru na poziomie powierzchni izobarycznych 925 i 850 hPa, czyli około 800 - 1500 m nad ziemią w zależności od wysokości geopotencjału zmieniającego się wraz z położeniem układów barycznych. Są to wysokości na których zachodzą główne czynniki kształtujące pogodę, które następnie przyczyniają się do dynamiki zjawisk atmosferycznych. Na mapie „WIND850” znajdziemy prędkości zbliżone często do tych z obszaru „WIND925”. Parametry przydatne są w prognozowaniu kierunku przemieszczania się chmur piętra niskiego. Czasem możemy spotkać taki przypadek, kiedy linie prądu zbiegają się ku sobie, co świadczy o lokalnej konwergencji (zbieżności) wiatru. Obecność linii dolno-troposferycznej zbieżności wiatru „wymusza” prądy wstępujące powietrza co często prowadzi do rozwoju chmur konwekcyjnych i opadów. Pojawia się ona m.in. w pobliżu frontów atmosferycznych (przed frontem powietrze napływa z innego kierunku niż za nim).

Parametr jest wizualizowany m.in. pod nazwą „**850 hPaStromlinien**” na stronie internetowej <https://www.wetterzentrale.de/de/topkarten.php?model=gfs&time=3&lid=OP>.



Ryc. 18. Przykładowa obliczana przez model GFS 0.25° prędkość i kierunek wiatru na powierzchni izobarycznej 850 hPa.

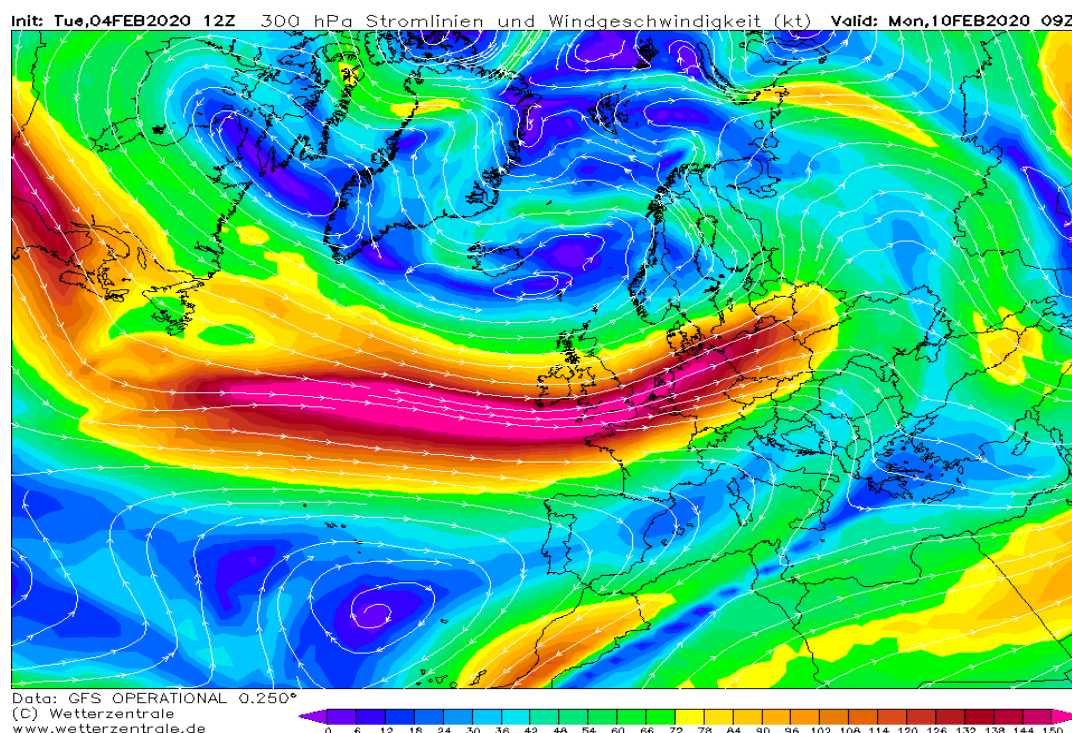
Źródło: <https://www.wetterzentrale.de/de/topkarten.php?model=gfs&time=3&lid=OP>.

- **Wiatr na wysokości 300 hPa**

Wiatr występujący w warstwie położonej ok. 9 – 10 km nad powierzchnią ziemi. Jest to wysokość na której znajduje się tzw. górno-troposferyczny prąd strumieniowy (ang. *jetstream*)²⁶. Związany jest on z frontem polarnym umiarkowanych szerokości geograficznych (zobacz str. 37) i formuje się w pobliżu dużego kontrastu termicznego. Parametr ten jest szczególnie ważny w meteorologii. Przy odpowiednim ułożeniu prądu, wykorzystanie go przy locie samolotu na wschód skraca czas tego lotu, tymczasem w odwrotnej sytuacji przy locie na zachód znacznie wydłuża czas i powoduje zwiększone zużycie paliwa. Na kontynencie europejskim prądy strumieniowe największą aktywność osiągają podczas zimy, gdyż wtedy występują największe różnice w temperaturze powietrza na północ i południe od frontu polarnego oraz osiągane jest maksimum cyrkulacji strefowej (atlantyckiej). Prędkość i ułożenie tego górno-troposferycznego strumienia powietrza może w dużym stopniu wpływać na trasę i rozwój niżów umiarkowanych szerokości geograficznych. Omawiany parametr można spotkać

²⁶Prąd strumieniowy – intensywny poziomy strumień powietrza, przenoszący olbrzymie masy powietrza powstający na dużym kontraście termicznym. Analizując pionowy przekrój atmosfery to właśnie w jego obrębie występuje najsilniejszy wiatr.

na <https://www.wetterzentrale.de/de/topkarten.php?model=gfs&time=3&lid=OP> pod nazwą „300 hPa Wind”.



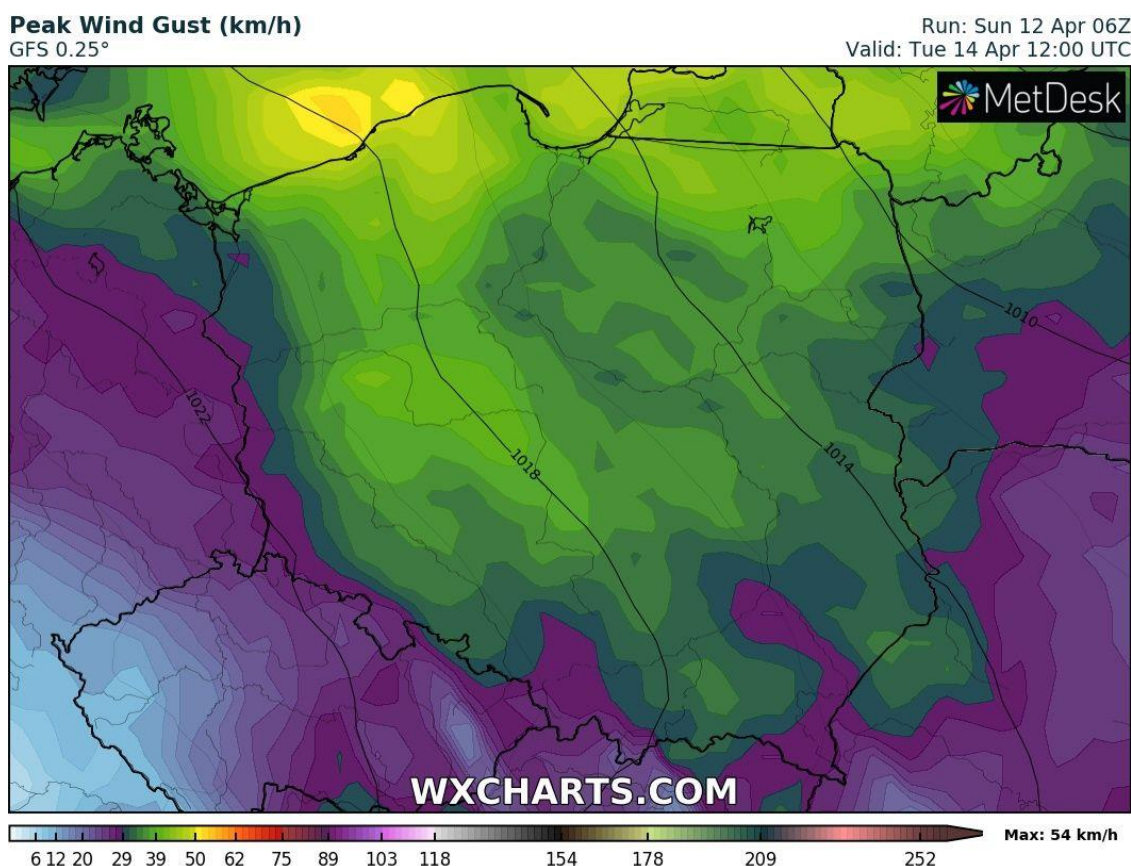
Ryc. 19. Obliczana przez model GFS 0.25° prędkość i kierunek wiatru na powierzchni izobarycznej 300 hPa (ok. 9 km nad poziomem gruntu) na 10 lutego 2020 r., godz. 9 UTC. Na grafice widoczny jest ułożony w przybliżeniu równoleżnikowo górnotroposferyczny prąd strumieniowy wchodzący od zachodu nad obszar Zachodniej i Środkowej Europy. Źródło grafiki: <https://www.wetterzentrale.de/de/topkarten.php?model=gfs&time=3&lid=OP>.

• Porywy wiatru

Mapa, na której przedstawiane są wartości możliwych maksymalnych porywów wiatru (ang. *wind gusts*). Wartości te podawane są w metrach na sekundę [m/s], na identycznej zasadzie jak przy poprzednich parametrach wiatru. Należy zaznaczyć, że parametr ten nie uwzględnia chwilowych, ale gwałtownych porywów konwekcyjnych, które zwykle są wyższe niż te na zaprezentowanych obliczeniach (patrz niżej). **Do oszacowania możliwych maksymalnych porywów wiatru towarzyszących konwekcji przydatne są wyliczenia modelu UMPL.** Szczególnie wysokie prędkości wiatru towarzyszyć mogą tzw. **linii szkwału**²⁷ powstającej na froncie atmosferycznym lub ogólnie rzecz biorąc burzom.

²⁷ Linia szkwału – strefa burz układających się w linię formujących się zazwyczaj na froncie chłodnym. Często towarzyszą jej silne porywy wiatru oraz intensywne opady deszczu.

Ten parametr wizualizowany jest m.in. na <https://www.wxcharts.com/> pod nazwą "Wind Gust".



Ryc. 20. Przykładowe obliczenia modelu GFS 0.25 z godziny 6 UTC 12 kwietnia przedstawiające maksymalne porywy wiatru wyliczane na godzinę 6 UTC, dnia 14 kwietnia. Najsilniejsze porywy miały zostać odnotowane na północy kraju, w pobliżu wybrzeża. Źródło grafiki: <https://www.wxcharts.com/>.

Analizując powyższe parametry podstawowe można dojść do wniosku że zmiana jednego elementu meteorologicznego pociąga za sobą inne. To jaka temperatura powietrza będzie przy powierzchni ziemi jest uzależnione od zachmurzenia. Prędkość wiatru jest uwarunkowana różnicą ciśnienia atmosferycznego na określonym obszarze. Wielkość opadu z kolei zależy od temperatury powietrza, bo im cieplejsza masa powietrza tym potencjalnie więcej pary wodnej może się w niej zmieścić. **Pogoda jest, więc zbiorem elementów meteorologicznych wzajemnie się uzupełniających, a prognozowanie to analiza tych powiązań w oparciu o „gotowe produkty” jakimi są m.in. modele numeryczne czy mapy synoptyczne.**

2. Omówienie modelu GFS w oparciu o parametry konwekcyjne

Parametry konwekcyjne przedstawiane są jako wynik skomplikowanych obliczeń modeli numerycznych i służą do analizowania siły prądów wznoszących powietrza oraz zmian prędkości jak i kierunku wiatru na różnych wysokościach. W związku z tym parametry podzielić można na główne dwie grupy: **termodynamiczne** oraz **kinematyczne**. Podwyższone wartości tych wskaźników w tym samym czasie i w jednym miejscu mogą wskazywać na **możliwość rozwoju burz o zorganizowanej postaci** (superkomórek burzowych²⁸ czy mezoskalowych układów konwekcyjnych²⁹). Do prognozowania burz przydatne będą także wspomniane wcześniej elementy wilgotności powietrza oraz związane z nimi poziom kondensacji (LCL), czy wodność troposfery³⁰. Generalnie, im większa zawartość wilgoci w powietrzu tym chmury o budowie pionowej przynosić mogą silniejszy opad deszczu (o większym natężeniu). Duża wilgotność powietrza w połączeniu z podwyższoną chwiejnością termodynamiczną może sprzyjać powstaniu tzw. głębokiej, wilgotnej konwekcji³¹ (ang. *Deep Moist Convection*).

Aby rozwinęła się komórka burzowa wznoszące się powietrze nie tylko musi być cieplejsze od otoczenia, ale także dostatecznie wilgotne, by mogło dojść do skraplania pary wodnej. Podczas kondensacji wydzielane jest ciepło, co nie pozwala do wyrównania się temperatury powietrza uniesionego (często używa się określenia tzw. cząstki powietrza) i otoczenia. Chmura *Cumulonimbus* rozbudowuje się tak wysoko dopóki temperatura wznoszącej się cząstki powietrza ochładzając się adiabatycznie³² nie zrówna się z temperaturą powietrza otaczającego. W rezultacie następuje proces wypiętrzania się i rozwoju chmury burzowej. Dla rozwoju burzy istotne są pionowe uskoki oraz skrętność wiatru, które wpływają na odseparowanie powietrza wznoszącego i opadającego oraz niekiedy na „wirowanie” prądów pionowych powietrza w chmurze *Cumulonimbus*. „Najgroźniejsze pogodowe

²⁸ Superkomórka burzowa (ang. *supercell*) – burza zawierająca wirujący prąd wstępujący powietrza, tzw. mezocyklon. W sprzyjających warunkach istnieje przez wiele godzin i generuje na swojej drodze różnego typu groźne zjawiska np. opady dużego gradu, niszczące porywy wiatru czy trąby powietrzne.

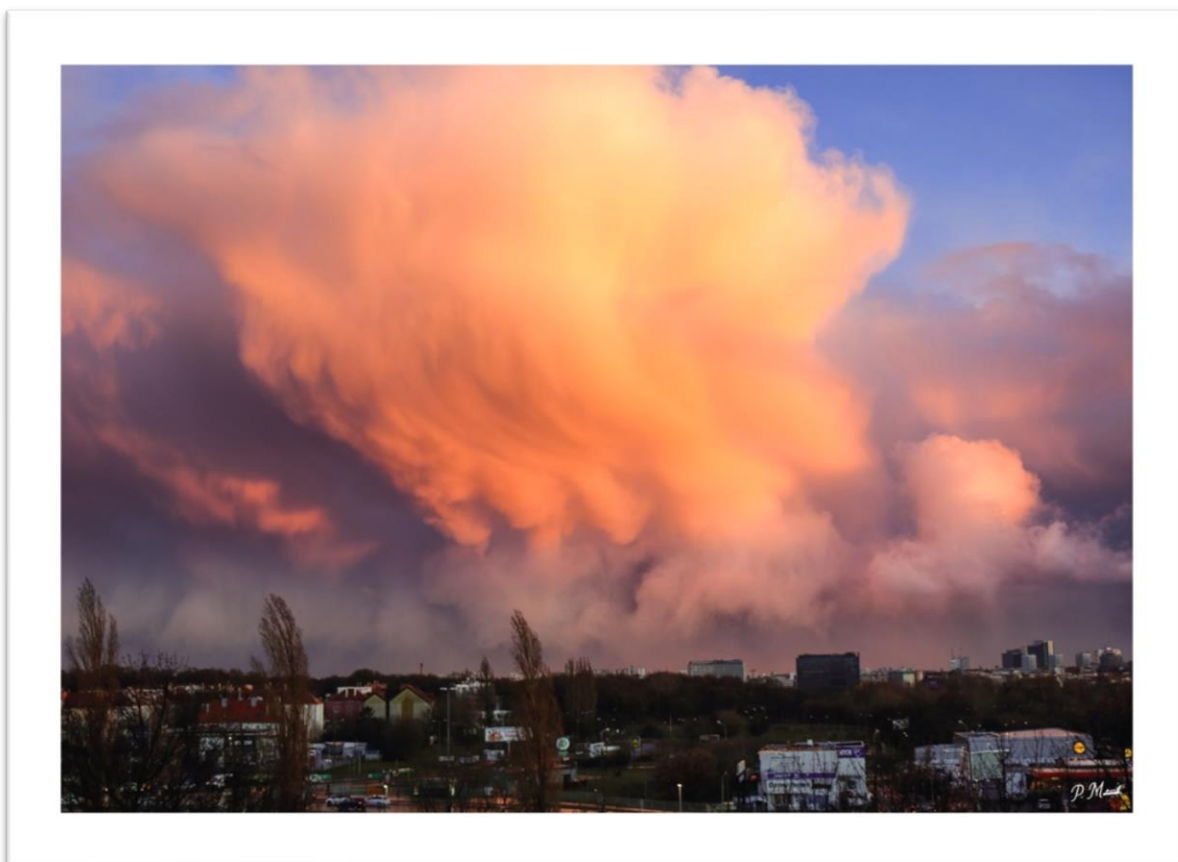
²⁹ Mezoskalowy układ konwekcyjny (ang. *mesoscale convective system*, w skrócie MCS)- rozległy układ burzowy, powstający najczęściej z połączenia kilku oddzielnych burz. Trwa kilka godzin, często przechodzi kilkaset kilometrów zanim osłabnie. Może być wbudowana w niego linia szkwału.

³⁰ Wodność troposfery (ang. *Precipitable water*, w skrócie PW) - ilość wody w pionowej kolumnie powietrza. Jej wielkość wyraża się w mm lub calach.

³¹ Głęboka, wilgotna konwekcja rozwija się w środowisku silnych prądów pionowych powietrza oraz dużej zawartości wilgoci w pionowym przekroju troposfery. Na rozległym obszarze powstaje wtedy wiele aktywnych burz o różnej, czasem zorganizowanej postaci.

³² Zmiana adiabatyczna to zmiana bez wymiany ciepła z otoczeniem.

sytuacje mają miejsce na obszarach, gdzie występuje jednocześnie duża chwiejność termodynamiczna i dynamiczne pionowe profile wiatru.” (Ostrowski, Surowiecki, Trębicki, 2010).



Ryc. 21 Chmura Cumulonimbus (Cb) oświetlana promieniami zachodzącego słońca nad Poznaniem. Fot. Patryk Matczak

2.1.Chwiejność termodynamiczna

Energia potencjalna dostępna drogą konwekcyjną (ang. *convective available potential energy*) to podstawowa wielkość określająca siłę prądów wnoszących w troposferze. Tylko przy dodatniej wartości CAPE mogą powstać burze. Z drugiej zaś strony sama podwyższona wartość CAPE może nie wystarczyć do rozwoju komórki burzowej. Co więcej, silne pionowe ścinanie wiatru, wysoka wilgotność troposfery będą miały duże większe znaczenie dla dłuższego utrzymywania się chmury *Cumulonimbus*. Przy bardzo wysokich wartościach parametrów kinematycznych nawet niewielka ilość CAPE może doprowadzić do inicjacji groźnych zjawisk związanych z chmurą kłębiasto-deszczową, jakimi są grad, niszczące porywy wiatru czy nawalne opady deszczu.

- **MUCAPE** (ang. *Most Unstable CAPE*) - energia potencjalna dostępna drogą konwekcyjną z najbardziej niestabilnej warstwy troposfery. **Podstawowy parametr konwekcyjny** ukazujący siłę prądów wznoszących w troposferze.

- **MLCAPE** (ang. *Mixed Layer CAPE*) - wartość energii potencjalnej dostępnej drogą konwekcyjną obliczana dla uśrednionej cząstki z dolnych 100 hPa troposfery (warstwy ok. 0-1 km nad powierzchnią ziemi).

- **SBCAPE** (ang. *Surface Base CAPE*) - wartość CAPE liczona dla cząstki uniesionej od powierzchni ziemi.

Jakie wielkości (w przybliżeniu) określają nam niską, średnią i wysoką chwiejność w umiarkowanych szerokościach geograficznych?

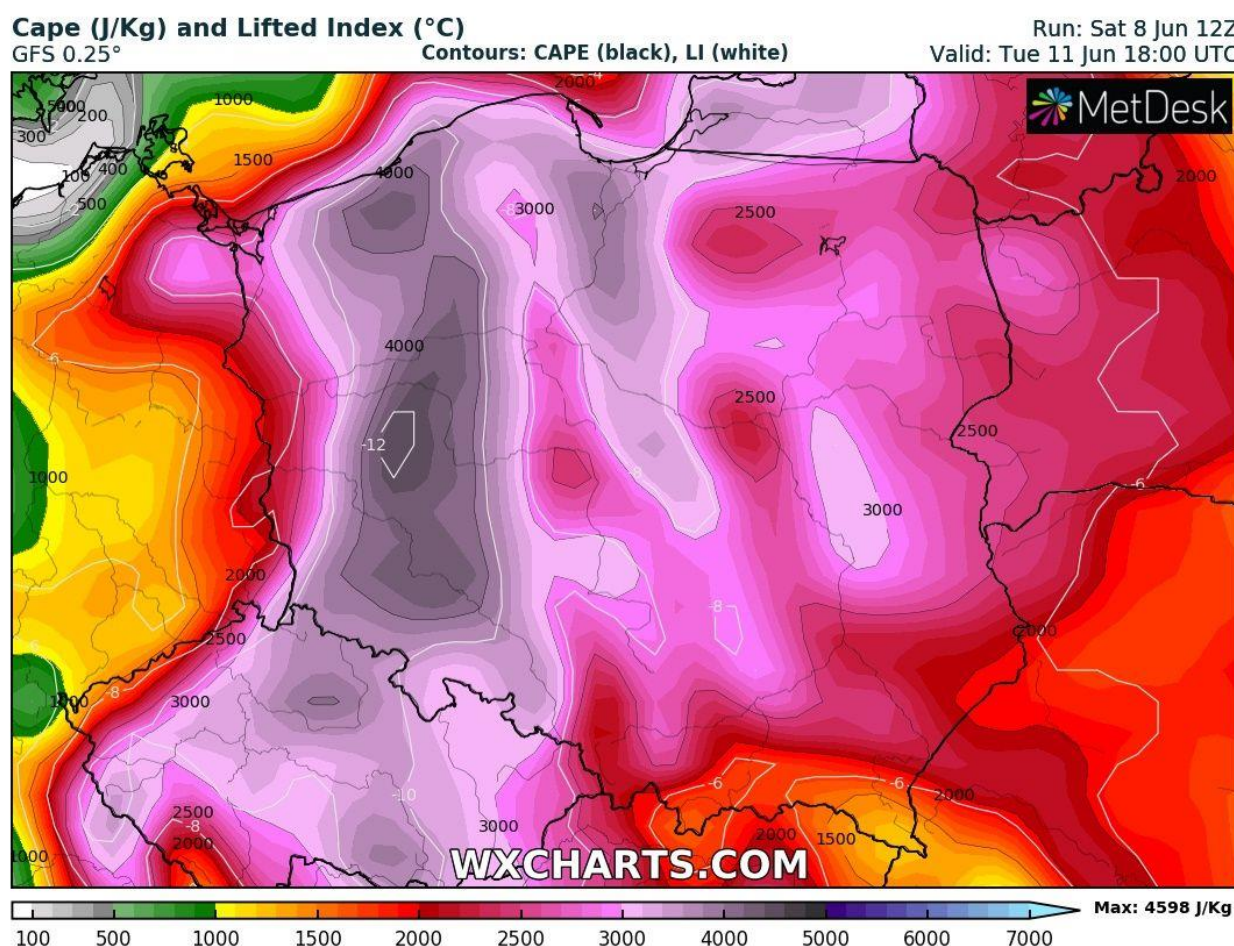
- Do 500 Jkg^{-1} **niewielka chwiejność**;
- Od 500 Jkg^{-1} do 1500 Jkg^{-1} **umiarkowana chwiejność**;
- Od 1500 Jkg^{-1} do 2500 Jkg^{-1} **duża chwiejność**;
- Powyżej 2500 Jkg^{-1} **bardzo duża chwiejność**.

Prognozowane wartości chwiejności termodynamicznej dostępne są m.in. na mapach:

- <http://www.lightningwizard.com/maps/> (połączone z innymi parametrami)
- <https://www.wxcharts.com/> pod nazwą „CAPE”.

- **LFTX** (ang. *Lifted Index*) - jest miarą niestabilności w troposferze. Wyraża się ją w $^{\circ}\text{C}$. **Parametr** ten przedstawia różnicę pomiędzy temperaturą otoczenia, a temperaturą wspomnianej wcześniej wznoszącej się cząstki powietrza na określonej wysokości (punktem odniesienia jest najczęściej poziom izobaryczny 500 hPa). Im niższe wartości tego wskaźnika są wskazywane przez wyliczenia modeli nu-

merycznych tym prąd wznoszący powietrza może być gwałtowniejszy. Niższe LI pokrywa się z większą chwiejnością termodynamiczną CAPE.



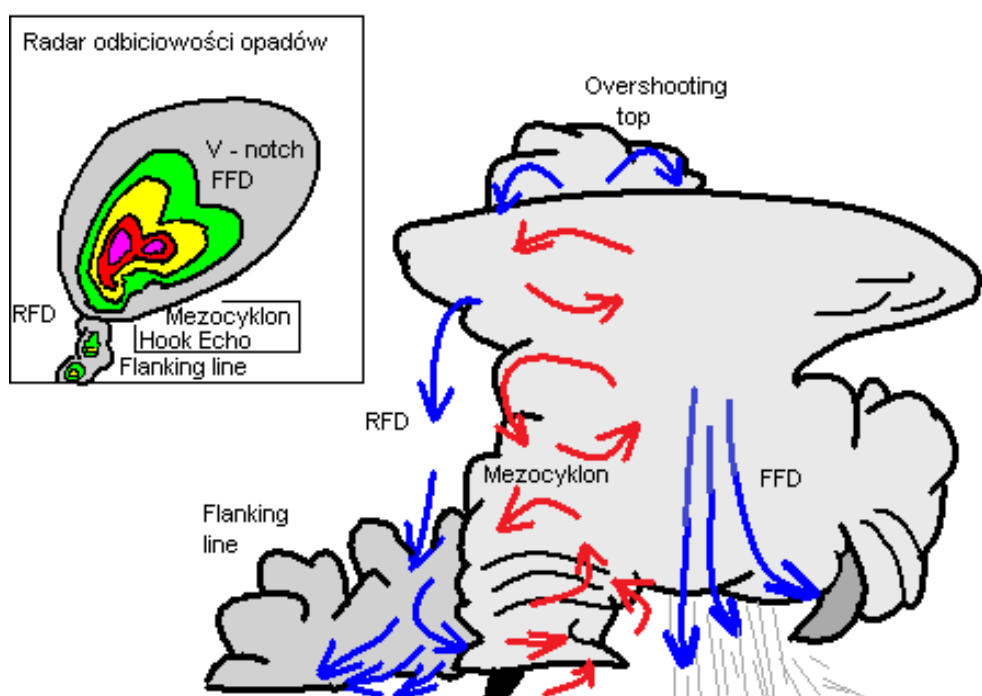
Ryc. 22. Obliczane przez model GFS 0.25° wartość CAPE (skala barwna) i Lifted Index (wartości liczbowe) na godz. 18 UTC, 11 czerwca 2019 roku (z aktualizacji zainicjowanej 8 czerwca 2019 roku). W tym dniu w warunkach ekstremalnej chwiejności termodynamicznej na zachodzie Polski odnotowano rozwój superkomórek burzowych z opadami bardzo dużego gradu. W Gorzowie Wielkopolskim średnica największych gradzin osiągnęła wówczas ok. 12 cm. Źródło grafiki:

<https://www.wxcharts.com/>.

2.2. Kinematyka

- **Deep Layer Shear lub SHEAR 0-6 km** - parametr kinematyczny pozwalający określić uskok wiatru od poziomu gruntu do 6 kilometrów nad powierzchnią ziemi. Im większa różnica prędkości wiatrów wiejących w troposferze na różnych wysokościach, tym wartości wskaźnika stają się wyższe.

Podwyższone wartości pionowego ścinania wiatru (np. SHEAR z warstwy od 0 do 6 km > 15 m/s) mogą prowadzić do odseparowania dwóch przeciwnie skierowanych prądów powietrza: wstępującego i zstępującego. W skrajnych przypadkach może dojść do rozwoju superkomórki burzowej zawierającej mezocyklon z rotującym prądem wstępującym powietrza. Omawiany parametr można spotkać pod nazwą „Bulk Shear” na stronie <https://www.wxcharts.com/> (zobacz m.in. str. 66) .



Ryc. 23. Schemat pionowych prądów powietrznych występujących w superkomórce burzowej.

Źródło: <https://lowcyburz.pl/superkomorka/superkomorka-cechy/>

- **LLS 0-1 km** (ang. *Low Level Shear*) - pionowy uskok wiatru z dolnej, przyziemnej warstwy troposfery rozciągającej się od 0 do 1 km wysokości. Im wyższe wartości tego wskaźnika tym większe zmiany prędkości wiatru notuje się w pionowym przekroju przyziemnej warstwy troposfery. Parametr ten jest przydatny do prognozowania przyziemnych wirów powietrza w tym, także tornad. Możemy go znaleźć na stronie <http://www.lightningwizard.com/maps/> pod nazwą „0-1 km low level shear”.

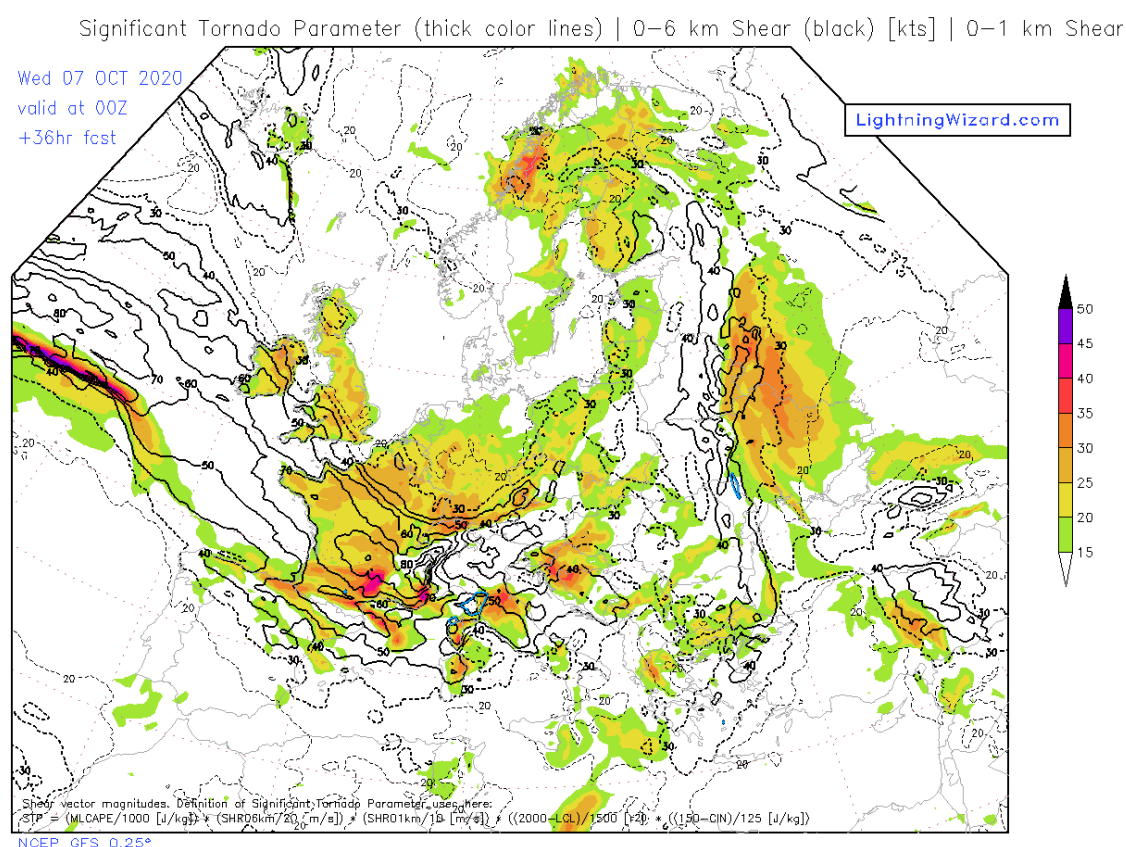
- **SRH 0-3 km** (ang. *Storm Relative Helicity*) - skrętność wiatru obliczana dla warstwy 0-3 km nad powierzchnią ziemi. Parametr ten przedstawia zmianę kierunku przepływu powietrza wraz z wysokością. Wysokie wartości tego wskaźnika ($>300 \text{ m}^2/\text{s}^2$) w połączeniu z obecnością chwiejności termodynamicznej o określonej wartości mogą wskazywać na możliwość rozwoju burz z rotującym prądem wstępującym (superkomórek burzowych). Podwyższona skrętność wiatru często pojawia się w pobliżu

styku sąsiadujących ze sobą dwóch odmiennych termicznie mas powietrza rozdzielanych frontem atmosferycznym, w tym w pobliżu centrów niżów i zatok niskiego ciśnienia. Parametr dostępny jest m.in. na <https://www.wxcharts.com/> pod nazwą „Storm relative Helicity” (patrz str. 57).

Jakie wielkości (w przybliżeniu) określają nam niskie, umiarkowane i wysokie pionowe uskoki wiatru w umiarkowanych szerokościach geograficznych?

SHEAR 0-6 km:

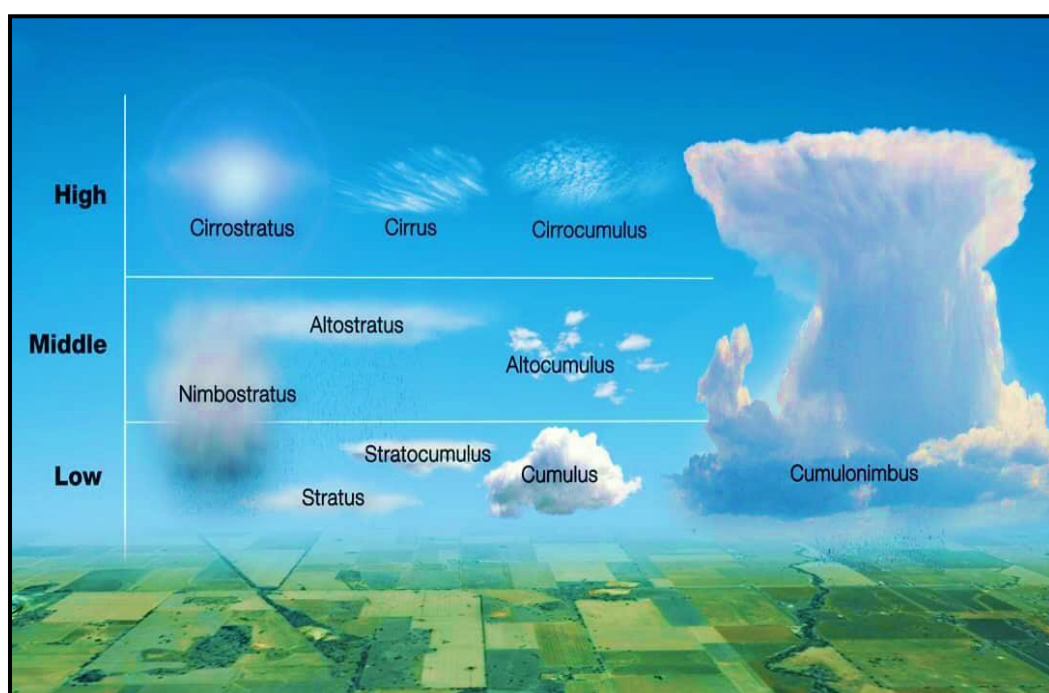
- od ok. 10 ms^{-1} do ok. 15 ms^{-1} niski;
- od ok. 15 ms^{-1} do ok. 25 ms^{-1} umiarkowany;
- od ok. 25 ms^{-1} do ok. 35 ms^{-1} wysoki;
- powyżej 35 ms^{-1} ekstremalny.



Ryc. 24. Przykład wizualizacji obliczanych przez model GFS trzech parametrów: **Significant Tornado Parameter**, **0-6 km Shear**, **0-1 km Shear** dla obszaru Europy. Źródło: <http://www.lightningwizard.com/maps/>.

2.3. Inne parametry konwekcyjne

Do chmur o budowie pionowej zaliczamy chmurę kłębiasto-deszczową (ang. *Cumulonimbus*) a także niektóre wypiętrzone chmury kłębiaste (ang. *Cumulus*) i ich gatunki np. *Cumulus congestus* (*Cu con*). Jak już wspomniano ten rodzaj zachmurzenia obejmuje wiele pięter (obrazek poniżej), gdyż działają w nim silne prądy pionowe. Rozwój chmury *Cumulonimbus* jest skutkiem wielu dynamicznych procesów zachodzących w pionowym przekroju troposfery. Procesy te mogą odbywać się nad danym obszarem w jednorodnej masie powietrza lub w trakcie przechodzenia frontów atmosferycznych. W związku z tym burze podzielić możemy na dwie grupy: **wewnątrzmasowe oraz frontowe**.



Ryc. 25. Wszystkie rodzaje chmur z podziałem na piętra (ang. *high* – wysokie; *middle* – średnie; *low* – niskie). Źródło:

<https://www.reddit.com/>.

- **Poziom kondensacji** (ang. *lifted condensation level*) - odpowiada wysokości (najczęściej podawanej w metrach) na której następuje skraplanie pary wodnej, a tym samym wysokości podstawy chmur konwekcyjnych. Niska wartość tego parametru wskazuje na dużą zawartość wilgoci w przyziemnej warstwie troposfery. Przy korzystnych warunkach termodynamiczno-kinematycznych taka sytuacja prowadzi do rozwoju komórek burzowych, unoszona cząstka powietrza względnie nisko jest już nasycona parą wodną i nie ma „przeszkód” do jej dalszego wędrowania ku górze. Wysoki poziom podstawy chmur konwekcyjnych może sugerować, że w przyziemnej warstwie troposfery hamowane są prądy pionowe. Wówczas w niektórych przypadkach doprowadzi to do powstrzymania rozwoju burzy. Jeśli

wilgotna cząstka powietrza przebiję się wpierw przez stabilną warstwę termiczną skraplanie pary wodnej może zachodzić wyżej (często ma to miejsce w godzinach wieczornych i nocnych po całym dniu silnej insolacji). To czy burze rozwiną się czy nie zależne jest od miąższości suchszego, stabilnego powietrza i towarzyszącej mu często inwersji temperatury powietrza. Grubość warstwy atmosfery o stabilnej stratyfikacji termicznej można odczytać z sondaży aerologicznych, a samą energię hamującą konwekcję w wyliczeniach modeli numerycznych jako **CIN** (ang. *convective inhibition*). Burze powstają czasami dopiero w godzinach wieczornych, po przebicciu się cząstki powietrza przez inwersję temperatury. **Powodem takiej sytuacji jest wystąpienie zwiększonej zawartości wilgoci w przyziemnej warstwie troposfery (wzrost wilgotności względnej powietrza w godzinach wieczornych) oraz obecność mechanizmów wspomagających wnoszenie się powietrza.** Czynnikiem wspomagającym może być np. linia konwergencji (zbieżności) wiatru. Burze tego typu wykazują w wielu przypadkach bardzo dużą aktywność elektryczną, a opisane wyżej środowisko w którym się tworzą jest nazywane w slangu łowców burz jako tzw. „załadowany karabin” (ang. *Loaded gun sounding*).

Wysokość wierzchołków chmur konwekcyjnych odpowiada miejscu, w którym wznosząca się cząstka powietrza ochładzając się zrównuje się z temperaturą otoczenia, a więc wysokości do której rozwija się konwekcja. Nazywamy ją poziomem równowagi **EL** (ang. *Equilibrium Level*). Do tego poziomu w przybliżeniu rozbudowuje się *Cumulonimbus* i związane z nim w górnej części kowadło (*incus*). Jednakże w niektórych przypadkach powyżej poziomu równowagi może znajdować się górny kraniec chmury kłębiasto-deszczowej, przyjmując formę **Overshooting Top**. Taka rozbudowa świadczy o silnym, gwałtownym prądzie wstępującym, który nie jest w stanie zahamować na wysokości EL.



Ryc. 26. Chmura *Cumulonimbus* z charakterystycznym kowadłem w jej górnej części zaobserwowana na obszarze Poznania.

Autor: Dawid Stępczyński.



Ryc. 27. Izolowana komórka burzowa zaobserwowana z miejscowości Janczewo. Autor: Dawid Stępczyński.

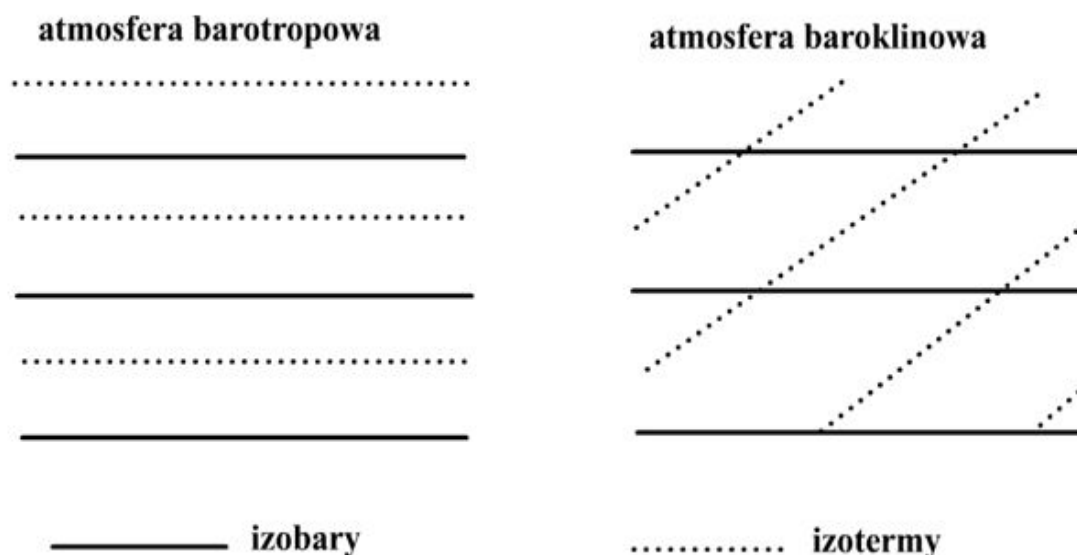
3. Charakterystyka układów barycznych, interpretacja map synoptycznych i porównanie z wyliczeniami modeli numerycznych.

Na podstawie różnych danych meteorologicznych m.in. aktualnych pomiarów ze stacji meteorologicznych przygotowuje się mapy synoptyczne. W niniejszym rozdziale nie będziemy skupiać się na zasadach sporządzania takich map. Omówione zostaną natomiast niektóre „dane” związane z cyrkulacją atmosferyczną: układy baryczne, fronty atmosferyczne i procesy odpowiedzialne za ich powstawanie. W obecnych czasach nowoczesnym produktem do prognozowania wartości różnych elementów meteorologicznych (np. termiki, wilgotności) służą opisane wcześniej wyliczenia modeli numerycznych.

Jednym z głównych danych przedstawianych na mapach synoptycznych jest ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza i związane z nim układy baryczne. Wyróżnia się:

- **Niż baryczny (cyklon)** to obszar obniżonego ciśnienia atmosferycznego, w którym ciśnienie maleje w kierunku centrum układu barycznego. Na półkuli północnej porusza się cyklonicznie, czyli przeciwnie do ruchu wskazówek zegara natomiast na półkuli południowej antycyklonicznie. W jego obrębie pojawiają się fronty atmosferyczne. Rozdzielają one różne masy powietrza charakteryzujące się swoistymi warunkami termicznymi czy wilgotnościowymi. Najprościej ujmując przejście niżu nad określonym obszarem jest więc związane z dużą zmianą pogody. Proces powstawania cyklonów umiarkowanych szerokości geograficznych nosi nazwę **cyklogenezy**.

Proces cyklogenezy rozpoczyna się od drobnego zaburzenia w obrębie stacjonarnego **frontu polarnego**, który w szerokościach umiarkowanych oddziela powietrze chłodniejsze w części północnej i cieplejsze w części południowej. Front ten faluje m.in. w wyniku odchyłeń od strefowego przepływu powietrza. W „stabilnej” atmosferze barotropowej izobary są położone równoległe do izoterm i występuje **barotropowość**. Powietrze przemieszcza się strefowo z zachodu na wschód. Zafalowanie powoduje natomiast utworzenie się **baroklinowości** i przecięcie się izoterm z izobarami. Wówczas w części zachodniej zaburzenia pojawia się adwekcja chłodu, w części wschodniej napływają cieplejsze masy powietrza.

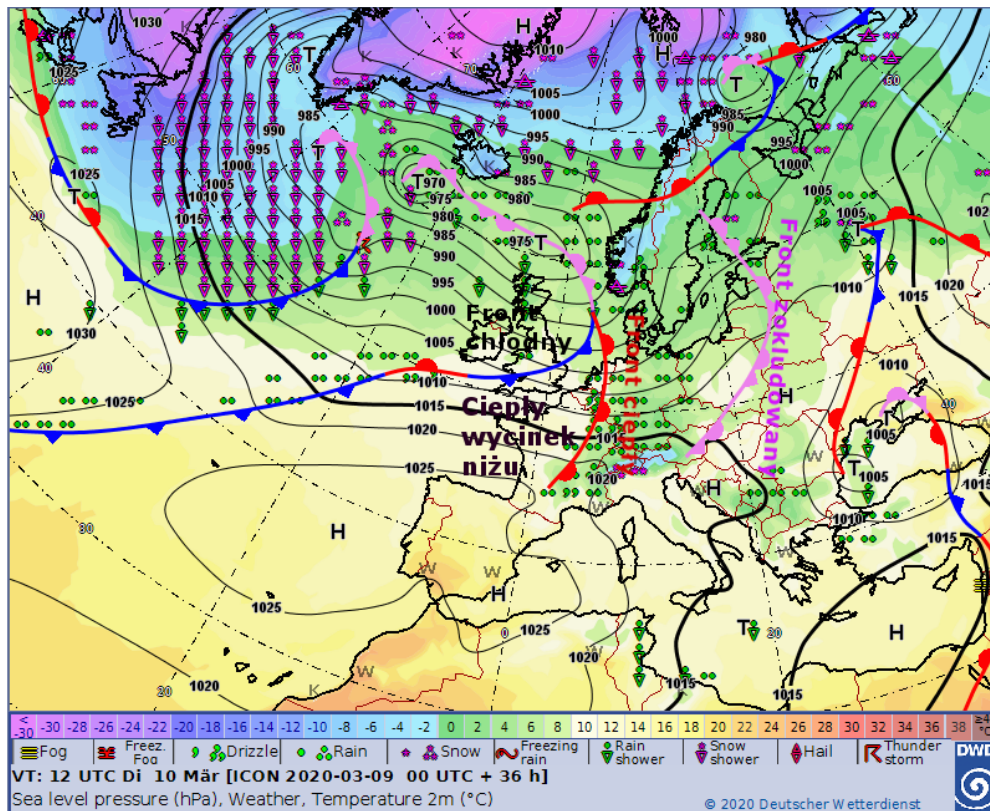


Ryc. 28. W atmosferze barotropowej izobary są równoległe do izoterm, w atmosferze baroklinowej izotermi przecinają się z izobarami (Kozuchowski, 2012). Źródło: Kozuchowski K., *Meteorologia i klimatologia*, Wyd. PWN, Warszawa

Występujący kontrast termiczny doprowadza do utworzenia się frontów atmosferycznych: ciepłego w części wschodniej i chłodnego w części zachodniej. Powstaje układ niskiego ciśnienia. Zwiększający się kontrast termiczny i występowanie silnego prądu strumieniowego w omawianym obszarze może doprowadzić do dalszego rozwoju i pogłębiania się niżu.

W części południowej układu niskiego ciśnienia pomiędzy frontem ciepłym, a chłodnym znajduje się tzw. **ciepły wycinek niżu**. Z czasem w procesie zanikania cyklonów umiarkowanych szerokości geograficznych, czyli cyklolizy oba rodzaje frontów łączą się tworząc **front zokludowany**.

W obszarze frontu ciepłego na ogół występuje bardzo szeroka strefa zachmurzenia o dużej rozciągłości poziomej oraz opady o **charakterze ciągłym i długotrwałym, wielkoskalowym, rzadziej konwekcyjnym, związanym z chmurami *Cumulonimbus***. Niekiedy opad trwać może nawet ponad dobę, przeważnie nie jest on intensywny. Następnie po jego przejściu niebo rozpogadza się i w ciepłym wycinku niżu w cieplejszej masie powietrza temperatura powietrza szybko zaczyna wzrastać, staje się wyższa niż przed nadejściem strefy rozległego zachmurzenia. Po „poprawie” pogody nadchodzi front chłodny. Chmury o budowie pionowej przynoszą względnie krótkotrwały, lecz **intensywny opad deszczu często w połączeniu z burzą**.



Ryc. 29. Mapa synoptyczna prezentująca sytuację na 10 marca 2020r., godz.12 UTC. Ciepły wycinek niżu znajduje się częściowo nad Francją i południową częścią Wielkiej Brytanii. Nad Niemcy nadchodzi front ciepły a nad północne wybrze-

za Francji front o charakterze chłodnym. W tym samym czasie od Zatoki Botnickiej przez kraje Nadbałtyckie po Austrię ciąga się zokludowany front atmosferyczny.

Źródło: https://www.dwd.de/DE/leistungen/hobbymet_wk_europa/hobbyeuropakarten.html

-**Wyż baryczny(antycyklon)** to „obszar atmosfery, w którym na danym poziomie ciśnienie powietrza jest wyższe od ciśnienia występującego na obszarze otaczającym.”(Woś, 2002). Na półkuli północnej wiruje antycyklonicznie, czyli zgodnie z ruchem wskazówek zegara natomiast na półkuli południowej cyklonicznie. Występowanie wyżu barycznego jest związane najczęściej ze stabilną równowagą termiczną atmosfery i osiadaniem mas powietrznych. Latem w obecności układu wysokiego ciśnienia nad danym rejonem notuje się przeważnie niską wilgotność powietrza, a co za tym idzie małe zachmurzenie lub jego brak oraz duży stopień usłonecznienia. W takich układach barycznych przy dominującym wpływie bilansu promieniowania kształtuje się **pogoda radiacyjna**.

Niekiedy (szczególnie zimą) w obrębie wyżu może wystąpić niskie **zachmurzenie podinwersyjne**, które powstaje pod wpływem słabego przepływu powietrza, dominacji prądów zstępujących w atmosferze i gromadzenia się pary wodnej przy powierzchni ziemi. **Dominującym rodzajem chmury jest wówczas chmura warstwowa *Stratus*, który nie przynosi opadów lub pada z niej mżawka, śnieg bądź śnieg ziarnisty (notowana jest w rezultacie niewielka suma opadów).**

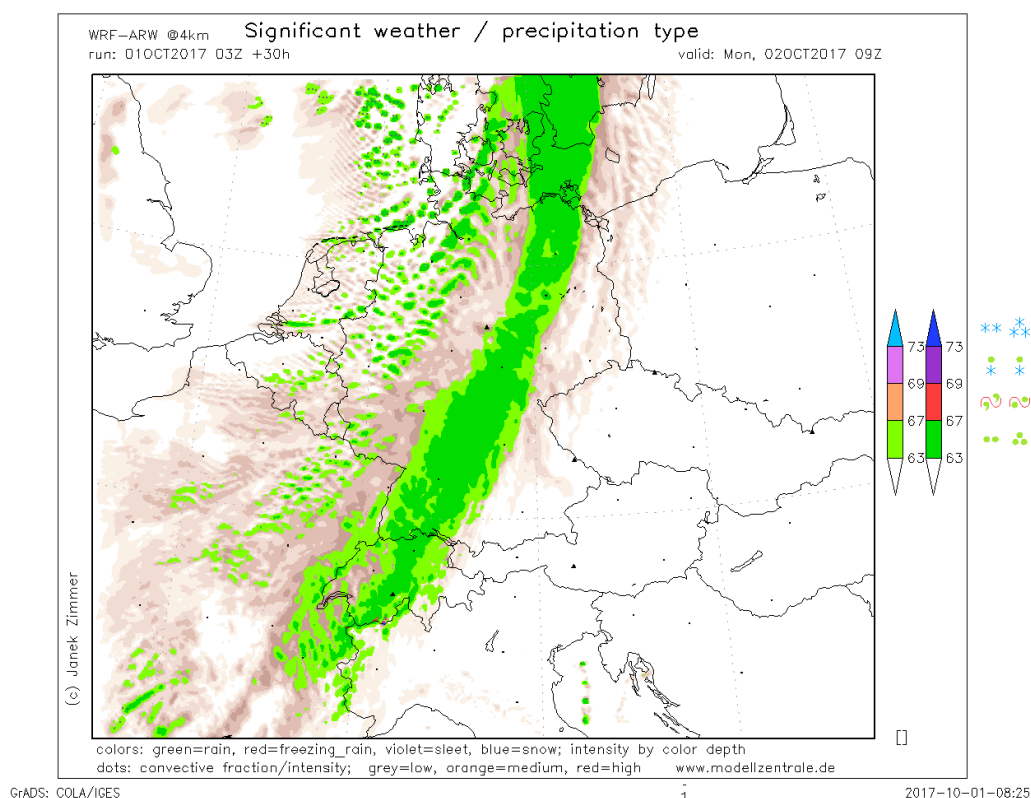
4. Inne modele numeryczne (UMPL, WRF, ECMWF)

Należy wspomnieć o innych, istotnych modelach numerycznych niezbędnych do przewidywania zmian stanów fizycznych atmosfery. **Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (ICM)** oblicza parametry krótkoterminowego modelu o wysokiej rozdzielczości nazywanego **UMPL** (ang. *Unified model for Poland*). Model został natomiast opracowany przez **Brytyjską Służbę Meteorologiczną**. Proces aktualizacji następuje 4 razy na dobę (00, 06, 12, 18 UTC). Cechuje go wysoka rozdzielczość, a jego wyniki przedstawiane są w siatkach 4 i 1,5 kilometrowych. W związku z tym miejsca dla których wylicza się wartości parametrów są oddalone o 1,5 km oraz o 4 kilometry w zależności od wersji prognostycznej. Gęstsza siatka pomiarowa może okazać się pomocna w miejscach, gdzie działają lokalne systemy cyrkulacyjne (np. bryza, fen), na mniejszych powierzchniowo obszarach. Obliczone dane wizualizowane są w formie map i meteogramów na stronie internetowej <http://mapy.meteo.pl/>. Podobnie jak w przypadku modelu GFS możemy

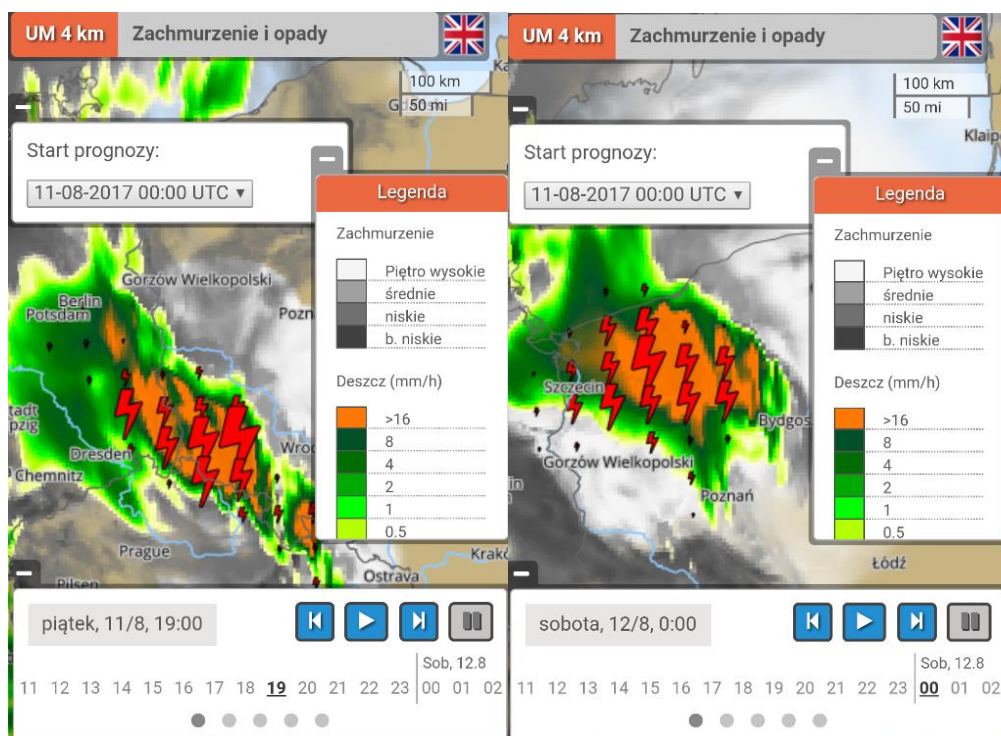
odczytać temperaturę powietrza, powierzchni, ciśnienie na poziomie morza, prędkość i porywy wiatru, zachmurzenie oraz opady. Na podstawie wyników modelu UMPL można również oszacować obszar rozwoju konwekcji z burzami.

The Weather Research and Forecasting (WRF) został stworzony we współpracy m.in. takich organizacji naukowych jak National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) oraz National Center for Atmospheric Research (NCAR). Wizualizowane na mapach parametry dla obszaru centralnej Europy są dostępne m.in. na stronie <http://www.modellzentrale.de/>. Zakres czasowy i dokładność prognoz jest zależna od wersji wybranej rozdzielczości (siatki 4,12,24 km).

Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF) jest międzynarodową organizacją do której należy większość krajów europejskich. ECMWF jest jednocześnie naukową instytucją i operacyjnym serwisem pracującym 24 godziny na dobę, tworzącym i rozpowszechniającym numeryczne prognozy pogody dla tych krajów (na podstawie <https://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are>).



Ryc. 30. Obliczany przez model numeryczny WRF 4 km rodzaj i natężenie opadów na 2 października 2017 r., godz. 09:00 UTC. Na mapie widoczna jest rozległa strefa opadów deszczu o natężeniu słabym i umiarkowanym, związana z przechodzącym chłodnym frontem atmosferycznym. Za tą strefą symulowane są konwekcyjne opady deszczu o charakterze przelotnym, widoczne w postaci „bąbli”. Źródło: <http://www.modellzentrale.de/WRF4km/#0>



Ryc. 31. Obliczany przez model numeryczny UMPL stopień zachmurzenia i natężenie opadów na wieczór i noc 11/12 sierpnia 2017 roku (na godz.19 i 00 UTC). Przewidywano rozwój rozległego układu burzowego, który w rzeczywistości przesunął się bardziej na wschód w stosunku do wyliczeń modelu UMPL z godz.00 UTC 11 sierpnia. Burza spowodowała olbrzymie szkody w drzewostanie i okazała się jedną z najsilniejszych w ostatnich kilkudziesięciu latach.

Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>

Podsumowanie części 1

Odczytywanie i analiza wyników prognoz pogody dla Polski w dłuższej skali czasu to ciekawa przygoda pomagająca szukać przyczyn szybkiej zmienności warunków atmosferycznych w naszym kraju. To jaki typ pogody panować będzie na określonym obszarze jest uzależnione w pierwszej kolejności od uwarunkowań cyrkulacyjnych, od tego jak ułożą się układy baryczne i jaka masa powietrza napłynie nad dany region. Zmiany w polu barycznym nad Europą pojawiają się w związku z obecnością frontu polarnego, którego zaburzenia intensyfikują niż baryczne umiarkowanych szerokości geograficznych. Informacje o panującym obecnie typie cyrkulacji na określonym obszarze odczytujemy m.in. z map synoptycznych. Różne elementy meteorologiczne (np. temperatura powietrza, wilgotność, zachmurzenie) na określonym obszarze będą się zmieniać nie tylko w zależności od cyrkulacji, ale także

od rzeźby terenu, ekspozycji stoków na oddziaływanie promieni słonecznych, szaty roślinnej i wielu, wielu innych czynników. Nowoczesnym produktem służącym do przewidywania wartości poszczególnych elementów meteorologicznych są modele numeryczne oparte na skomplikowanych działaniach matematycznych. Im większa rozdzielczość siatki obliczeniowej (mniejsze oczka obliczeniowe), tym łatwiej jest oszacować wartości parametrów na danym obszarze i uwzględnić czynniki lokalne.

Trafność prognoz pogody w miarę postępu technologicznego i unowocześnienia przyrządów pomiarowych staje się coraz większa. Nadal jednak występują duże rozbieżności pomiędzy wyliczeniami różnych modeli numerycznych, szczególnie podczas szybko zmieniającej się, dynamicznej sytuacji pogodowej. Dlatego też, olbrzymia moc obliczeniowa komputerów nie jest w stanie zastąpić doświadczonego obserwatora, który analizuje wszystkie wyniki o bieżącym i przewidywanym stanie atmosfery. Im dalszy termin obliczeń wykorzystywanych do sporządzania prognoz tym sprawdzalność jest mniejsza, gdyż pogodę cechuje znaczny stopień zmienności powiązanych ze sobą elementów meteorologicznych w czasie i w przestrzeni. **Wyliczenia modeli numerycznych, także cechuje niestabilność w odniesieniu do następujących po sobie w stałych terminach aktualizacjach obliczeń. Prezentują one często istotnie odmienne od siebie wyniki i tym samym różnią się od siebie.**

Burza jest jednym z najtrudniejszych do przewidzenia zjawisk atmosferycznych, gdyż jak wspomniano, na jej rozwój, aktywność, zorganizowanie wpływa wiele powiązanych ze sobą parametrów. Niedostateczna „ilość” jednego ważnego elementu może zaburzyć cały proces powstania zjawisk konwekcyjnych. Kolejnym istotnym aspektem odnoszącym się do trudności w prognozowaniu burz jest ich lokalność. Generalnie komórki burzowe rozwijają i przemieszczają się tam gdzie mają ku temu najbardziej sprzyjające warunki np. wysoka wilgotność powietrza, dynamiczny profil pionowy wiatru. Jednakże lokalne systemy cyrkulacyjne mogą wzmocnić lub osłabić proces konwekcji. Do dziś jest to kwestia badań naukowych.

Obecny świat ułatwia nam dostęp do wiedzy o aktualnym i przewidywanym stanie atmosfery. Według autora w dobie dzisiejszego szumu informacji i rozpowszechnianiu wielu „fake newsów” na temat zbliżających się warunków atmosferycznych warto zajrzeć do źródła nowoczesnych prognoz pogody, czyli wyliczeń modeli numerycznych.

Przydatne linki, na których także opiera się powyższa praca :

MODEL GFS (*ang. Global Forecast System*)

<https://meteomodel.pl/gfs-para/T2M/00>

<https://www.wetterzentrale.de/>

<https://www.wxcharts.com/>

<http://mapy.meteo.pl/>

<https://www.pivotalweather.com/>

MODEL UMPL (*ang. Unified model for Poland*)

<http://mapy.meteo.pl/>

<http://meteo.pl/>

MODEL WRF (*ang. The Weather Research and Forecasting*)

<http://www.modellzentrale.de/WRF4km/#0>

Obecna i prognozowana sytuacja synoptyczna:

https://www.dwd.de/DE/leistungen/hobbymet_wk_europa/hobbyeuropakarten.html

Część 2

5. Radary meteorologiczne

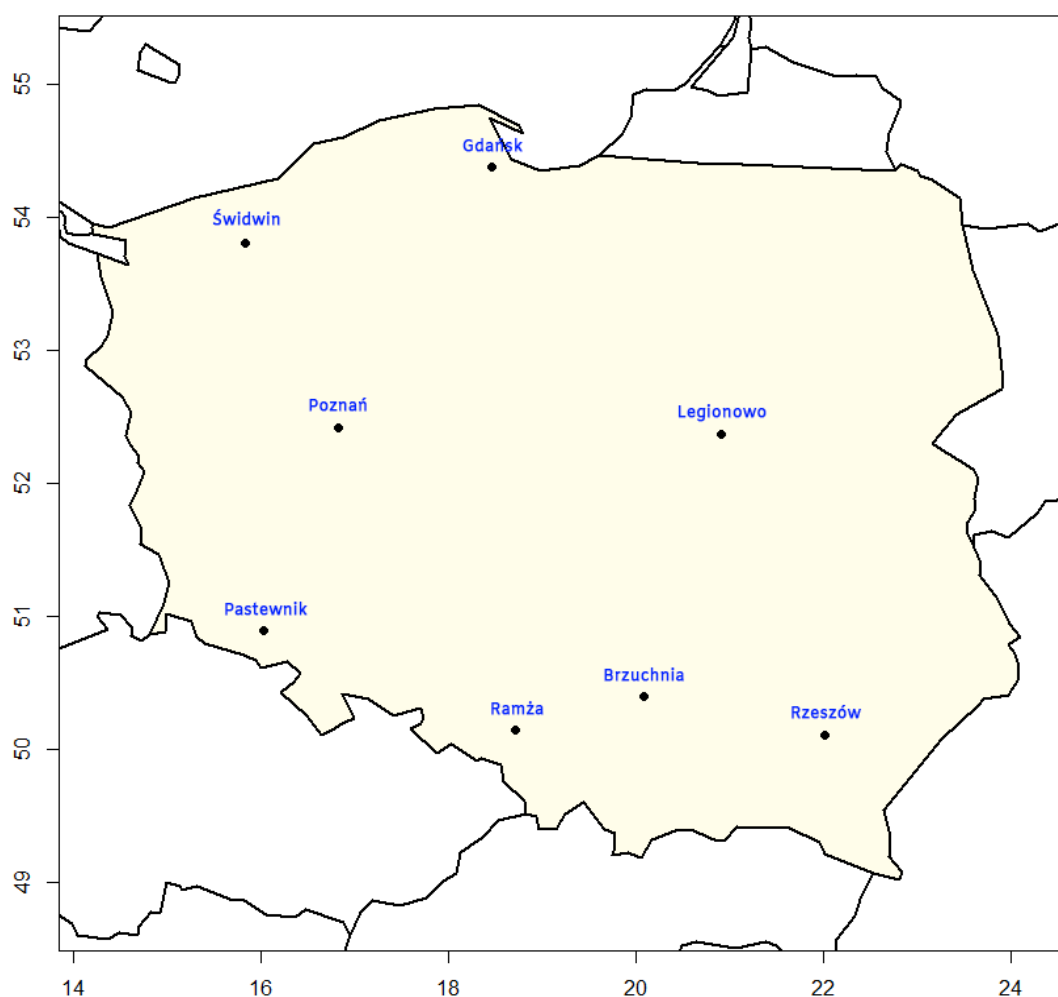


Ryc. 32. Radar meteorologiczny umiejscowiony w Pastewniku. Źródło: <https://polska-org.pl/8375846,foto.html>.

Po omówieniu wyliczeń modeli numerycznych i krótkiej charakterystyki pogody w układach barycznych warto wspomnieć o obrazach radarowych służących m.in. do identyfikacji miejsca występowania opadów i ich natężenia. Na podstawie aktualnych danych radarowych jesteśmy w stanie

zobaczyć określone sygnatury radarowe oraz przewidywać związane z nimi opady dużego gradu czy nawalne opady deszczu powodujące podtopienia i powodzie błyskawiczne, a niekiedy silne porywy wiatru dla najbliższych kilkudziesięciu minut.

Na obszarze Polski znajduje się 8 radarów meteorologicznych tworzących tzw. sieć POLRAD.



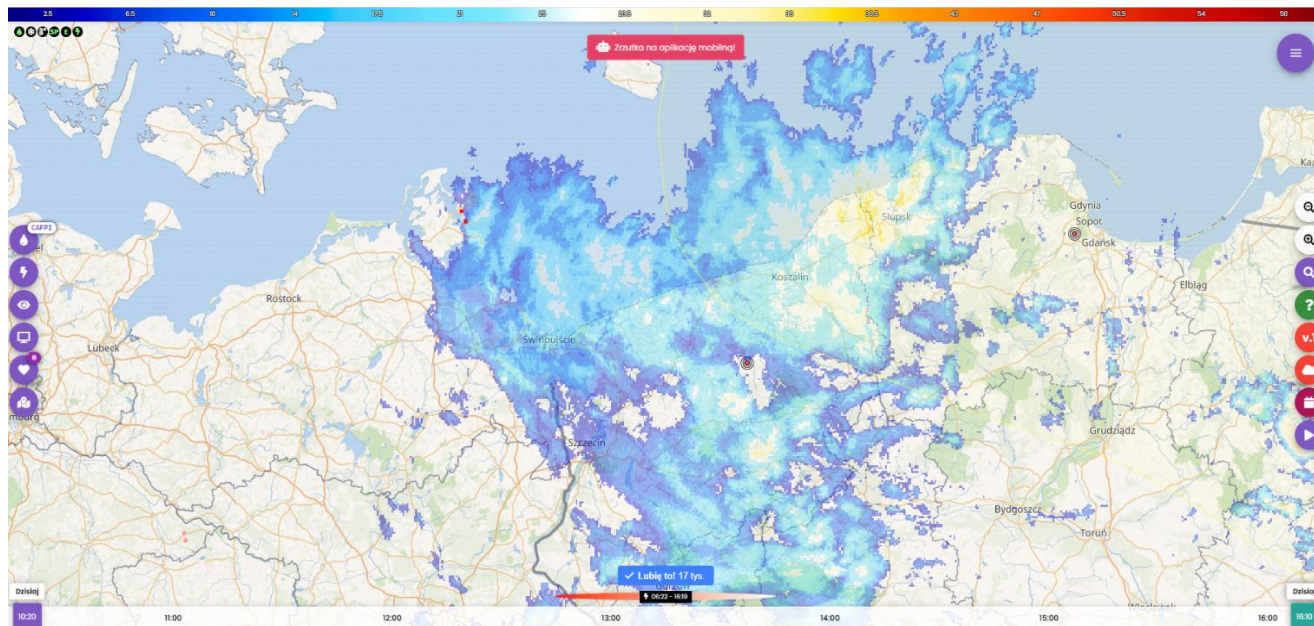
Ryc. 33. Rozmieszczenie radarów meteorologicznych na terenie Polski. Opracowanie własne.

Z obrazów radarowych odczytujemy tzw. odbiciowość (ang. *reflectivity*) która jest jednocześnie **echem radarowym**. Jej miarą jest dBZ (decybel na jednostkę Z). W dużym uproszczeniu, wiązka elektromagnetyczna emitowana z anteny radaru, „odbija się” od hydrometeorów, a następnie powraca dając przede wszystkim informacje o **wielkości i zagęszczeniu** kropelek wody, kryształków lodu i innych produktów kondensacji pary wodnej. Dane z polskiej sieci radarów meteorologicznych są dostępne m.in. na stronie **Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego**

Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) oraz w formie nieodpłatnego udostępniania na stronach amatorskich serwisów internetowych, jak np. <https://radar-opadow.pl/>. Aktualizacja danych następuje zwykle raz na 10 min, co oznacza że dane udostępniane są w przybliżeniu z 10 minutowym opóźnieniem. Przetworzony obraz radarowy pośrednio dostarcza informacji o zagęszczeniu i wielkości kropel wody w chmurze. Jeśli są one większe i występują „gęściej” to wskazywana jest wyższa odbiciowość, analogicznie przy występowaniu mniejszych hydrometeorów wizualizowana jest niższa odbiciowość. Możemy się, więc spodziewać że w obszarze mniejszej odbiciowości wystąpi słaby deszcz, natomiast w większej będzie on silniejszy.

Dostarczane przez IMGW-PIB produkty radarowe o odbiciowości różnią się od siebie w zależności od wykorzystanej **przestrzeni pomiarowej do prezentacji danych**. Najważniejsze z nich to:

CAPPI (ang. *Constant Altitude Plan Position Indicator*) - produkt przedstawiający rzut poziomy rozkładu odbiciowości na określonej wysokości nad powierzchnią ziemi. Na stronie internetowej <https://radar-opadow.pl/?radartype=cappi> udostępniane są dane z 1 km nad poziomem gruntu.

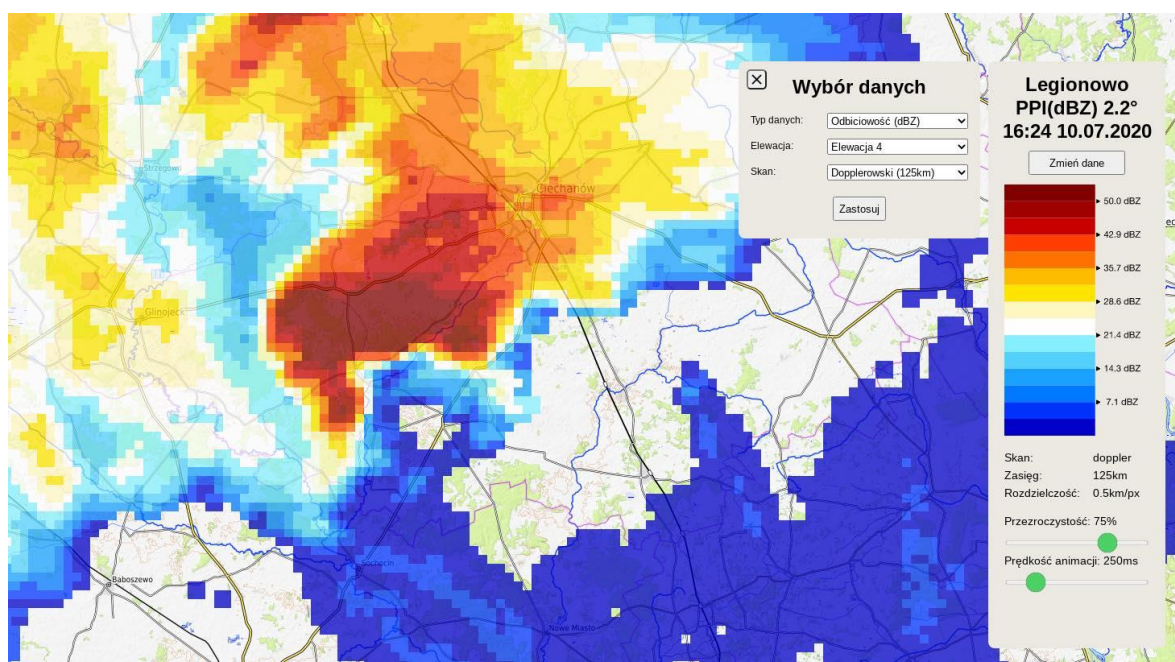


Ryc. 34. Przykładowy obraz radarowy w formie CAPPI na godzinę 16:10 dnia 2 września 2020 roku. Widoczna była wówczas rozległa strefa opadów obejmująca w jednym czasie m.in. zachodnią i środkową część polskiego wybrzeża. Największa odbiciowość (przekraczająca 30 dBZ) była wskazywana w okolicy Sławna i Słupska. Można więc wywnioskować że natężenie opadu było tam większe, padało tam „mocniej” niż w zachodniej części wybrzeża.

Źródło grafiki: <https://radar-opadow.pl/>.

CMAX (ang. *Column Max Reflectivity*) - odbiciowość maksymalna we wskazywanej przez radar przestrzeni. Obraz radarowy dostarcza informacji o **największej odbiciowości w przekroju pionowym nad danym punktem**. Jest, więc on przydatny do identyfikacji najbardziej intensywnych opadów atmosferycznych. Ograniczeniem tego produktu jest wykrywanie odbiciowości nad danym miejscem w sytuacji gdy opad na powierzchni ziemi nie występuje. Może tak się dzieć np. w przypadku przechodzenia frontów ciepłych czy obecności gęstych kowadeł chmur Cumulonimbus, kiedy to opadające z nich hydrometeory parują zanim dotrą do powierzchni ziemi.

PPI (ang. *Plan Position Indicator*) - odbiciowość wskazywana z różnych elewacji, tzn. kątów nachylenia anteny radaru meteorologicznego. Produkt ten wprowadzony został publicznie w roku 2020. Odbiciowość w tej formie w czasie rzeczywistym dostępna jest na: <http://daneradarowe.pl/>.



Ryc. 35. Sygnatura radarowa hook echo³³ widoczna na obrazie radarowym PPI 2.2° z dnia 10 lipca 2020r., godz. 16:24 UTC. Źródło grafiki: <http://daneradarowe.pl/>.

³³ Hook echo – charakterystyczna sygnatura odbiciowości radarowej, która świadczy o występowaniu superkomórki burzowej z rotującym prądem wstępującym (mezocyklonem). Po pojawieniu się hook echo wzrasta prawdopodobieństwo rozwoju trąby powietrznej.

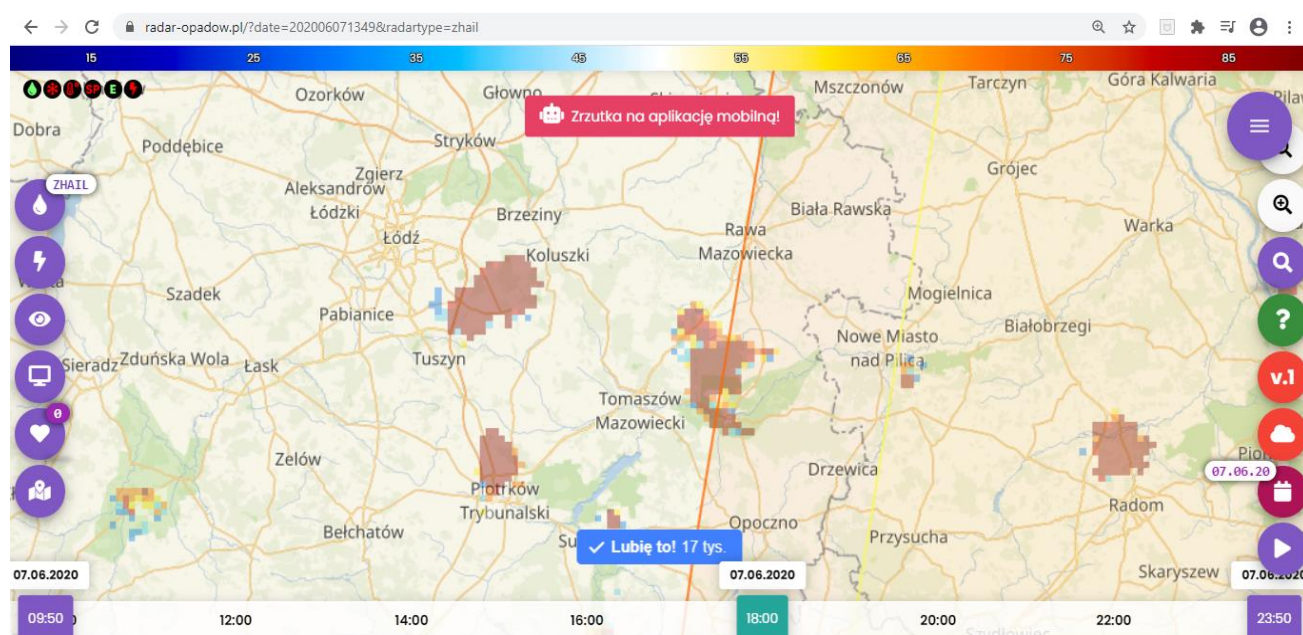
INNE PRODUKTY RADAROWE:

PAC (ang. *Precipitation Accumulation*) - szacowana suma opadów w mm/h.

SRI (ang. *Surface Rainfall Intensity*) - natężenie chwilowe opadu wyliczane w mm/h. Produkt ten pomaga oszacować zmienność intensywności opadu w danym miejscu i czasie.

EHT (ang. *echo top*) - wysokość wierzchołków echa radarowego, potencjalny wierzchołek chmur. Wyższe wartości świadczą o większej rozbudowie chmury w pionie, a więc o możliwości wystąpienia silniejszego opadu.

ZHAIL - prawdopodobieństwo wystąpienia opadów gradu. Produkt radarowy ZHAIL działa na bazie algorytmu *Hail Detection Algorithm (HDA)*, który na podstawie wysokości wartości odbiciowości przekraczającej 45 dBZ i poziomu izotermi zero³⁴ „wyciąga” prawdopodobieństwo pojawienia się opadu gradu.



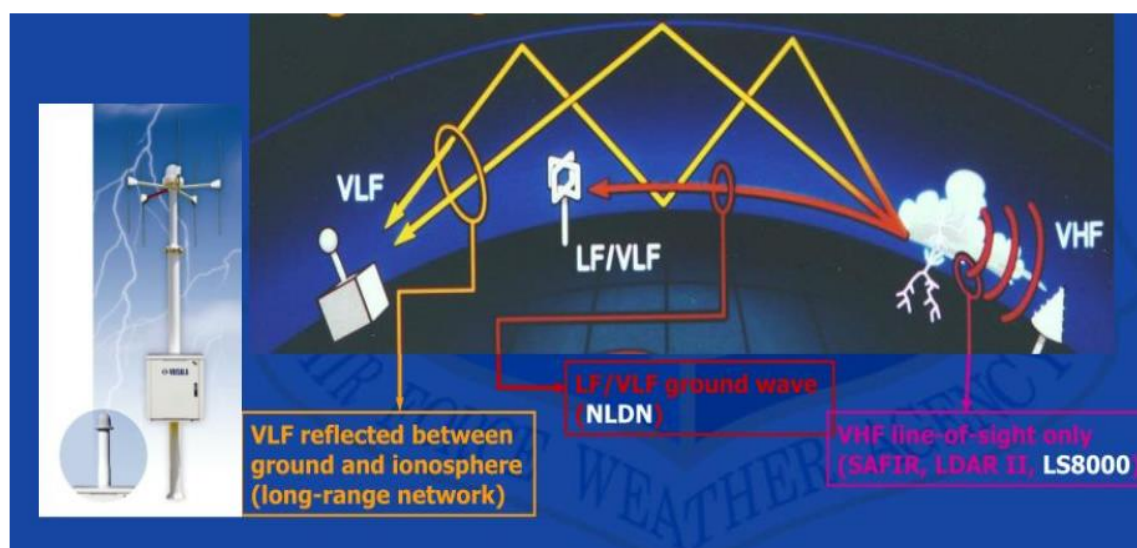
Ryc. 36. Obraz radarowy ZHAIL przedstawiający miejsca o podwyższonym prawdopodobieństwie opadów gradu 7 czerwca 2020r., o godz. 18 CEST. Średnica największych gradzin w okolicy Tomaszowa Mazowieckiego osiągnęła wówczas ok. 5 cm. Źródło grafiki: <https://radar-opadow.pl/?date=202006071349&radartype=z hail>.

³⁴ Izoterma zero - odpowiada wysokości, w której temperatura osiąga 0°C.

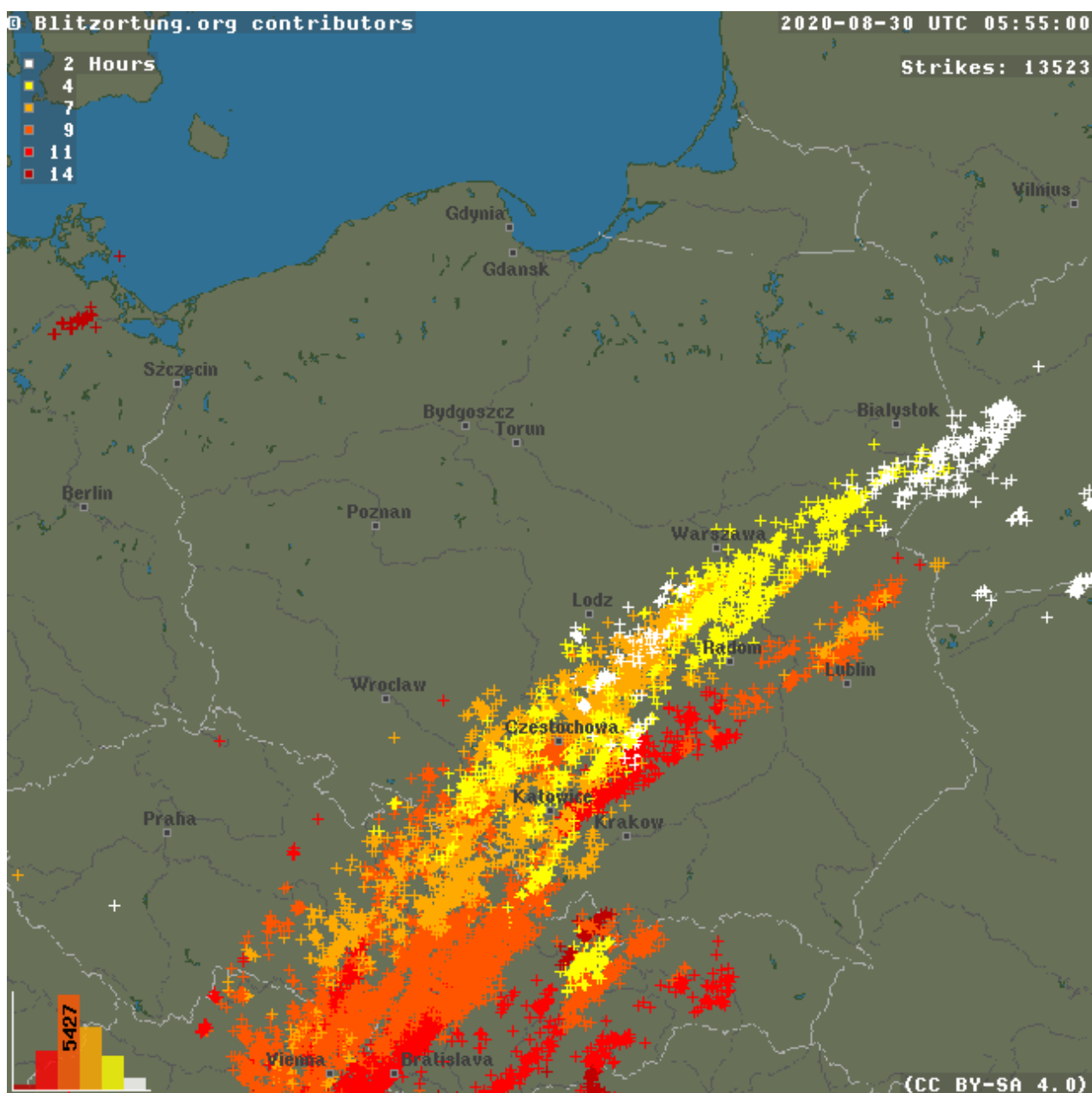
6. Detektory wyładowań atmosferycznych

Kolejnym niezbędnym narzędziem służącym do prognozowania pogody, a w szczególności zjawisk konwekcyjnych jest detektor wyładowań atmosferycznych. Sieć wykrywania wyładowań atmosferycznych dostarcza informacji o miejscu, liczbie i częstotliwości wyładowań atmosferycznych. Dane te w zestawieniu z danymi z radarów meteorologicznych umożliwiają określenie trasy komórek burzowych oraz potencjału do generowania gwałtownych zjawisk atmosferycznych. Jedną z powszechnie dostępnych sieci detekcji wyładowań jest **Blitzortung**. „Z punktu widzenia naszego kraju, sieć stacji detekcji Blitzortung oferuje obecnie największe możliwości związane ze śledzeniem burz w czasie rzeczywistym jak i możliwością dostępu do danych archiwalnych.” (<https://lowcyburz.pl/detektory/>).

Detektor wyładowań atmosferycznych to urządzenie, w którym zamontowany jest system czujników (obrazek na dole po lewej). Czujniki rejestrują wyładowania atmosferyczne za pomocą fal o określonej częstotliwości. W zależności od metody pomiaru częstotliwości fali elektromagnetycznej określone są współrzędne miejsca wystąpienia wyładowania atmosferycznego. Przykładowo kiedy występuje dodatnie wyładowanie atmosferyczne, jeden i drugi (a w przypadku wyładowań chmurowych także trzeci detektor – metoda triangulacyjna) rejestrują różnicę w czasie dotarcia fali elektromagnetycznej do detektorów i na tej podstawie wyznaczają wspomniane współrzędne.



Ryc. 37. Przykładowy schemat działania detektorów wyładowań atmosferycznych (źródło: Air Force WeatherAgency)



Ryc. 38. Mapa archiwalna stworzona na podstawie pomiarów z detektorów wyładowań atmosferycznych wykonywanych od godziny 15:55 UTC dnia 29 sierpnia do godziny 5:55 UTC dnia 30 sierpnia 2020 roku.

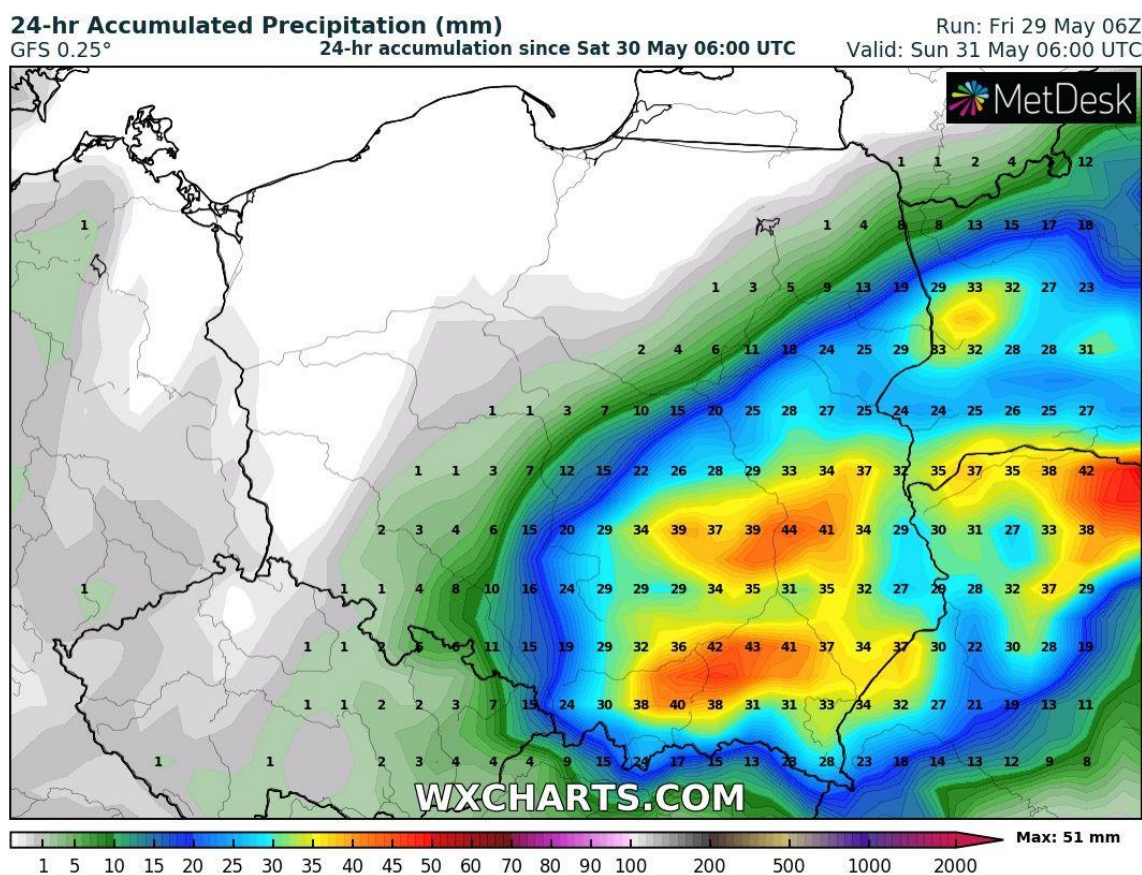
Źródło grafiki: https://www.blitzortung.org/en/live_lightning_maps.php?map=15

7. Prognozowanie w praktyce

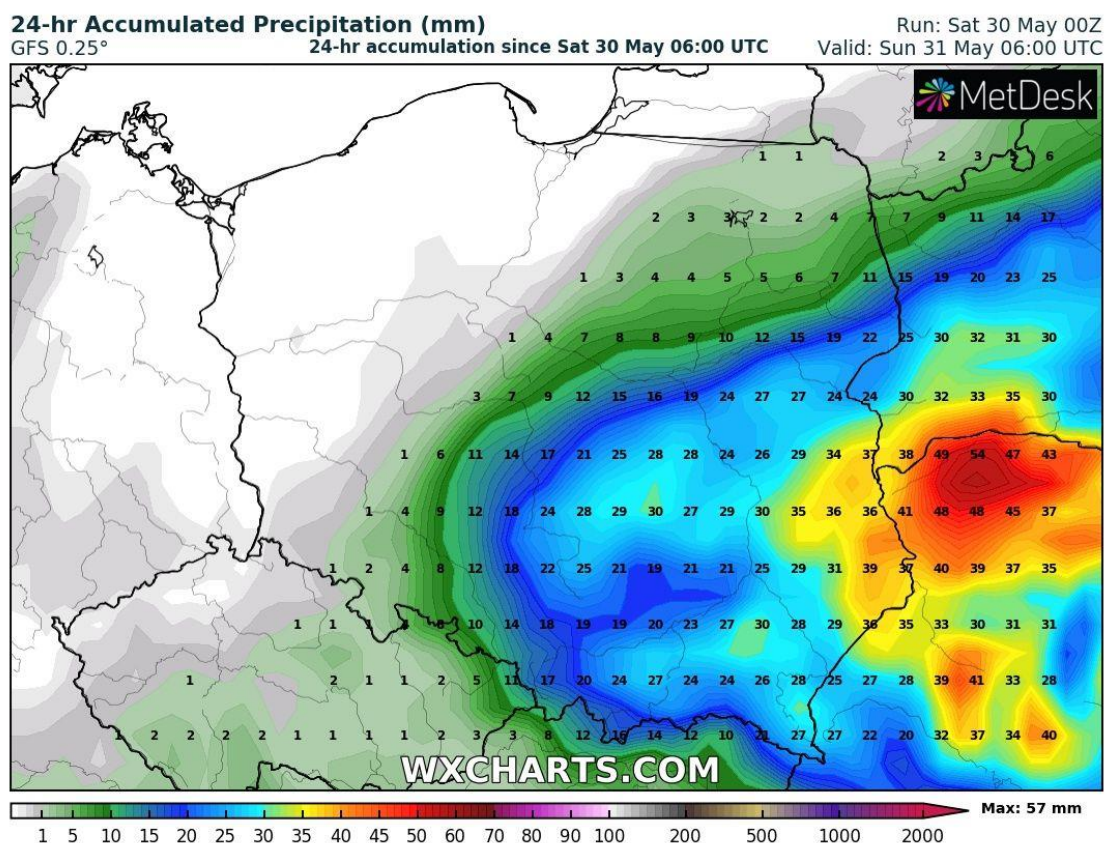
Niniejszy rozdział przedstawia informacje o tym, jak na podstawie wszystkich omówionych „produktów” do prognozowania pogody stworzyć własną interpretację dla nadchodzących warunków atmosferycznych.

PRZYKŁAD 1 PROGNOZOWANE INTENSYWNE OPADY DESZCZU W POŁUDNIOWO-WSCHODNIEJ CZĘŚCI KRAJU NA KONIEC MAJA 2020 ROKU.

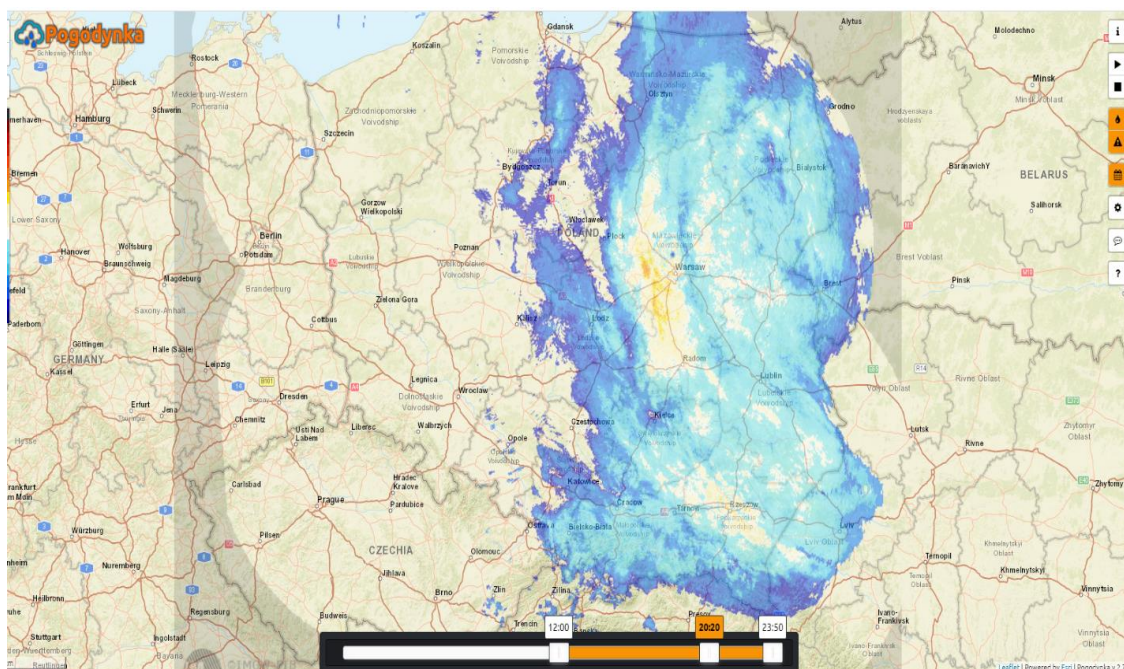
Aktualizacja modelu numerycznego GFS (ang. *Global Forecast System*) z godz. 06 UTC dnia 29 maja przewidywała na kolejny dzień wkroczenie od wschodu nad obszar Polski rozległej strefy opadów deszczu.



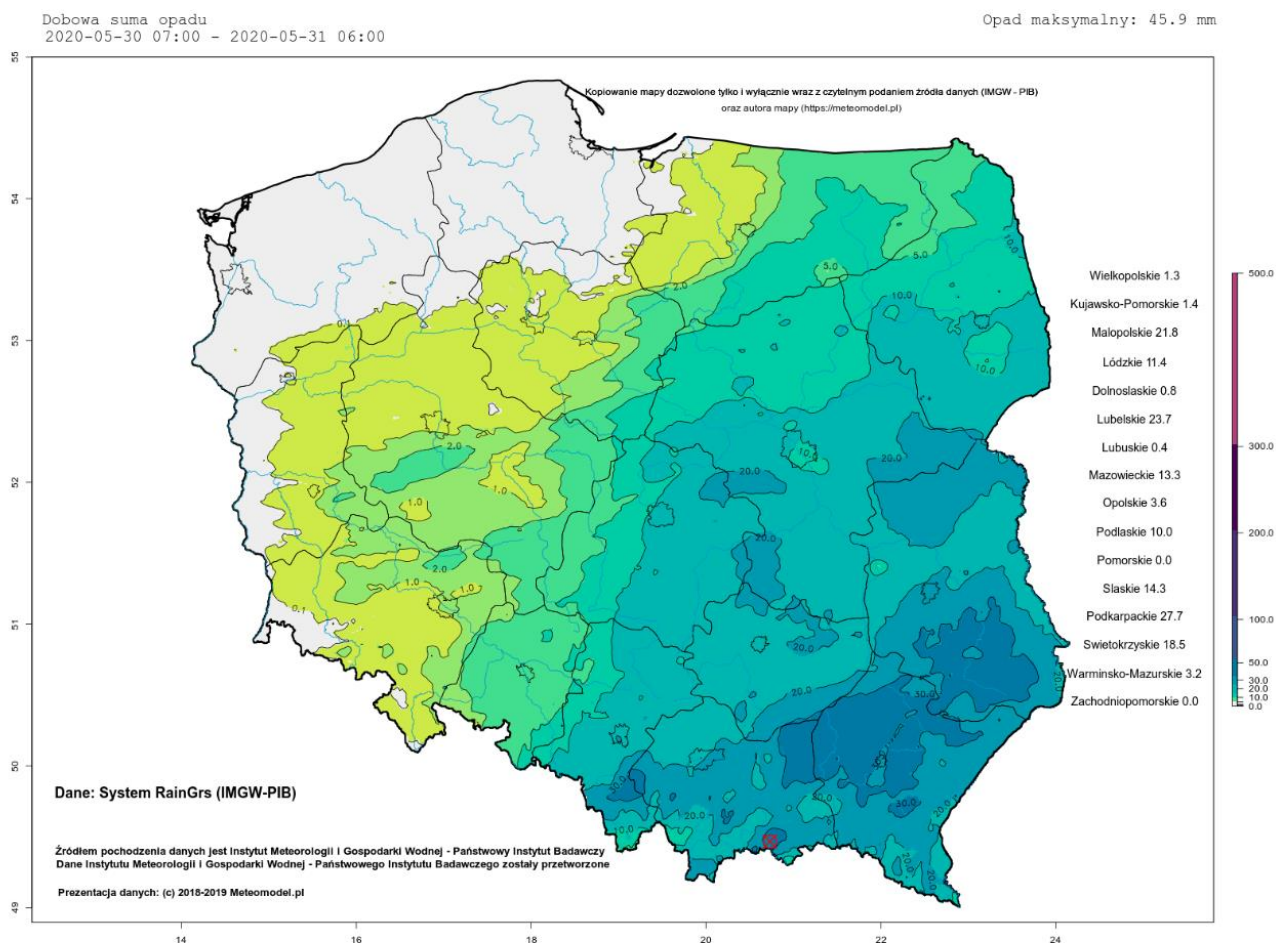
Ryc. 39. Obliczana przez model numeryczny GFS 0.25 suma opadów za dobę hydrologiczną (od godz. 6 UTC 30 maja do godz. 6 UTC 31 maja) miała sięgnąć miejscami ponad 40 mm. Największa suma była przewidywana na południowym-wschodzie Polski. Źródło: <https://www.wxcharts.com/>



Ryc. 40. Inna aktualizacja obliczeń zainicjowana tuż przed rozpoczęciem doby hydrologicznej (od godz. 6 UTC 30 maja do godz. 6 UTC 31 maja) wskazywała na niższą sumę opadów na znacznym obszarze Polski (szczególnie w centrum i na południu kraju). Źródło: <https://www.wxcharts.com/>



Ryc. 41. Zasięg rozległej strefy opadów niosącej opady deszczu o charakterze ciągłym z godziny 20:20 UTC omawianego dnia. Źródło: <https://czypada.pl/> na podstawie danych IMGW-PIB.



Ryc. 42. Rzeczywista dobowa suma opadów. Źródło: <https://meteomodel.pl/> na podstawie danych IMGW-PIB.

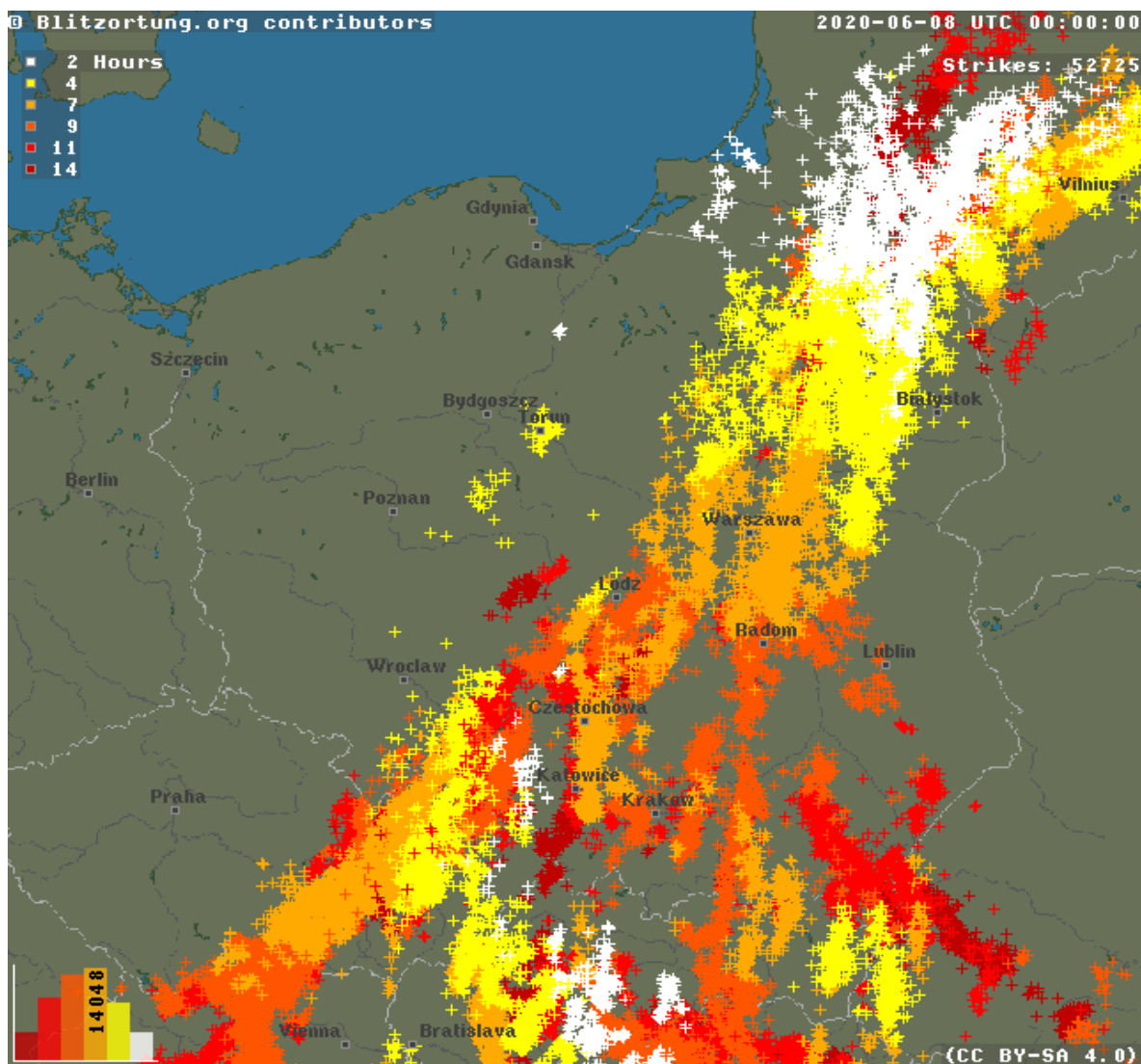
Ostatecznie na obszarze Polski opad maksymalny wyniósł 45,9 mm. Dla niektórych regionów aktualizacja pierwsza była bardziej trafna niż druga, natomiast dla innych miejsc naszego kraju druga „odsłona” wyliczeń GFS okazała się bardziej precyzyjna.

PRZYKŁAD 2 PROGNOZOWANE AKTYWNE BURZE 7 CZERWCA 2020 ROKU

Kilka dni przed 7 czerwca wyliczenia modeli numerycznych zaczęły wskazywać na możliwy rozwój aktywnych komórek burzowych przechodzących „prawie” południkowo w pobliżu chłodnego frontu atmosferycznego.

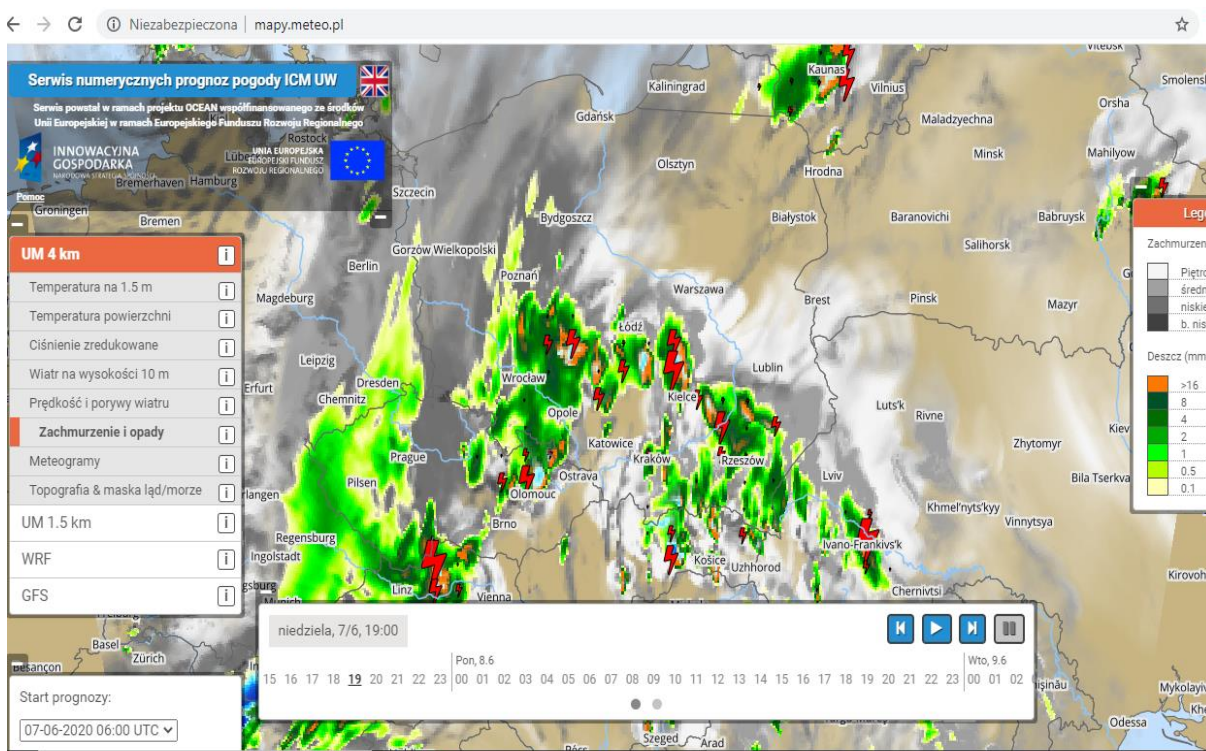
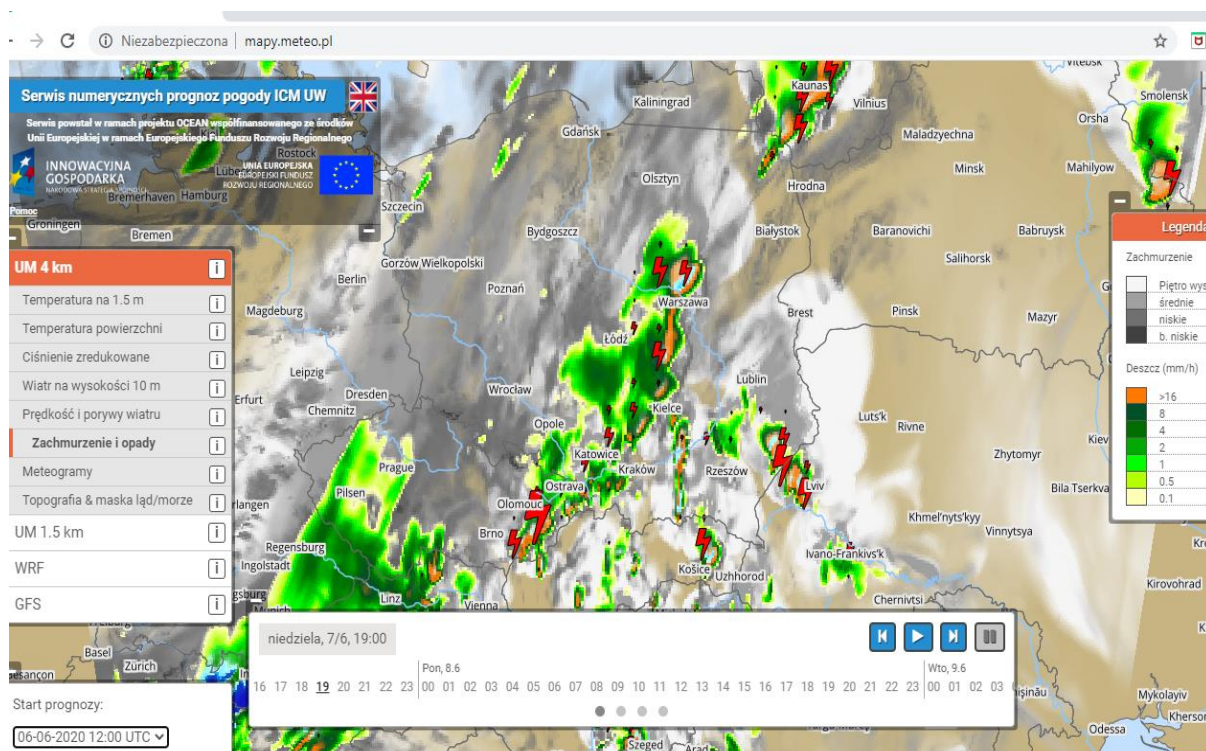
Przy prognozowaniu lokalizacji i aktywności burz istotne jest sprawdzenie przewidywanego miejsca wystąpienia chwiejności termodynamicznej i jego pokrycia z uskokami, czy skrętnością wia-

tru (inaczej mówiąc z pionowym profilem wiatru). Szczegóły opisane zostały w rozdziale 2. Na niektórych mapach przewidywane wartości ścinania wiatru podawane są w węzłach. 2 węzły w przybliżeniu odpowiadają 1 m/s.

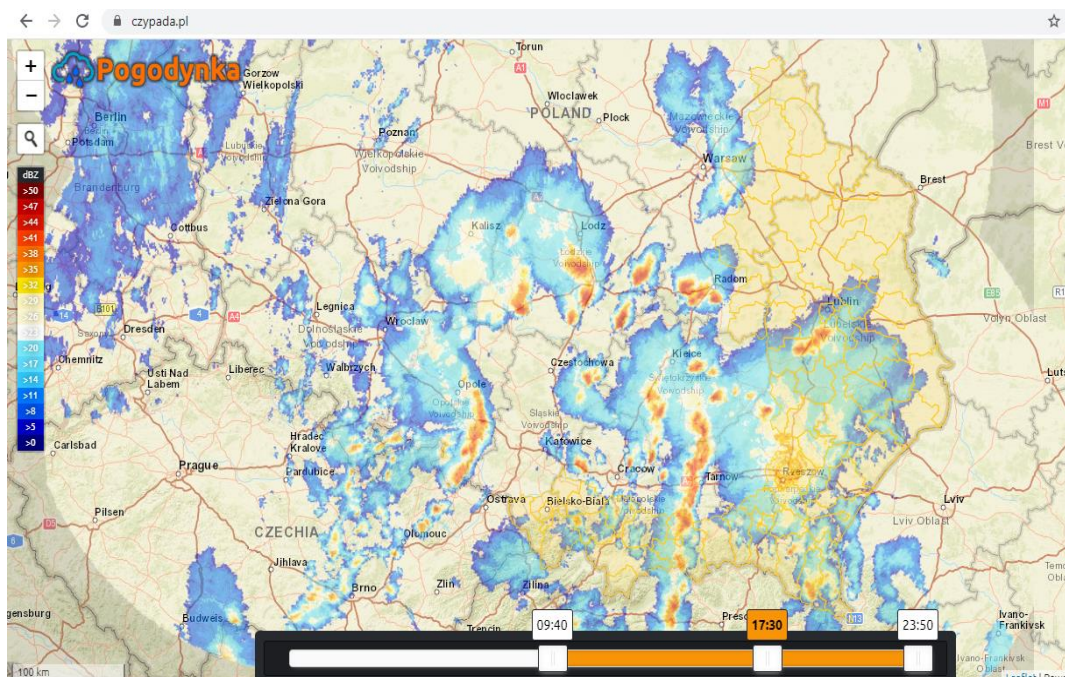


Ryc. 43. Wyładowania atmosferyczne wykryte przez sieć stacji detekcji Blitzortung 7 czerwca 2020 roku.

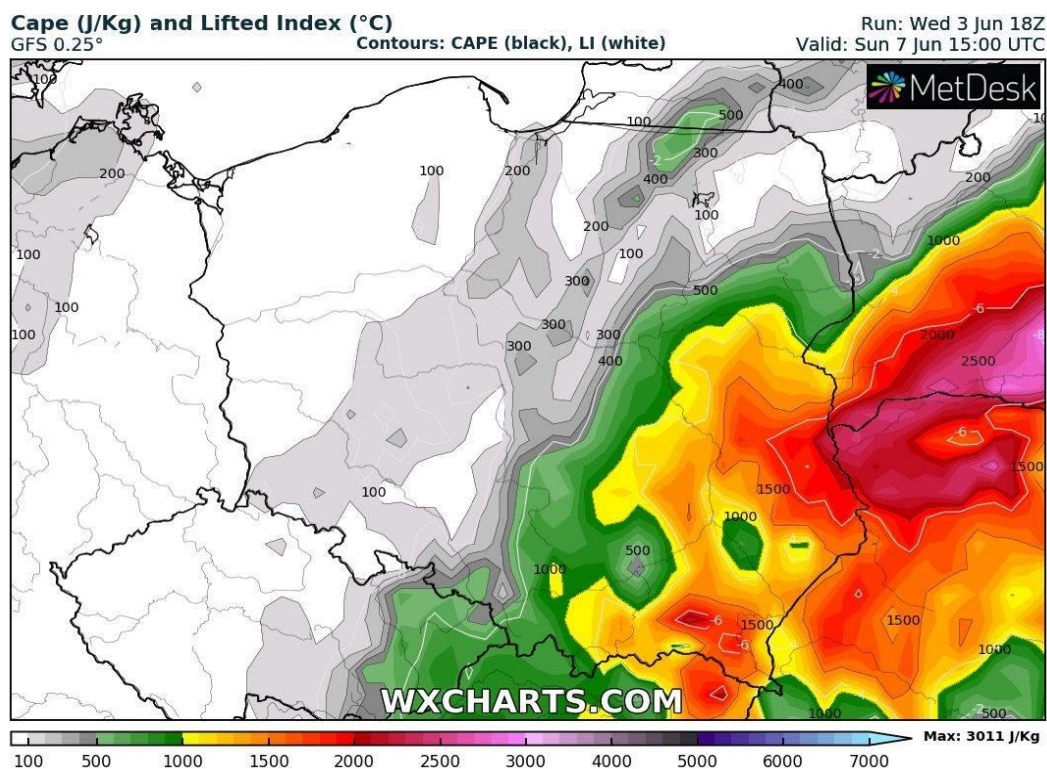
Źródło: http://pl.blitzortung.org/live_lightning_maps.php?map=15.



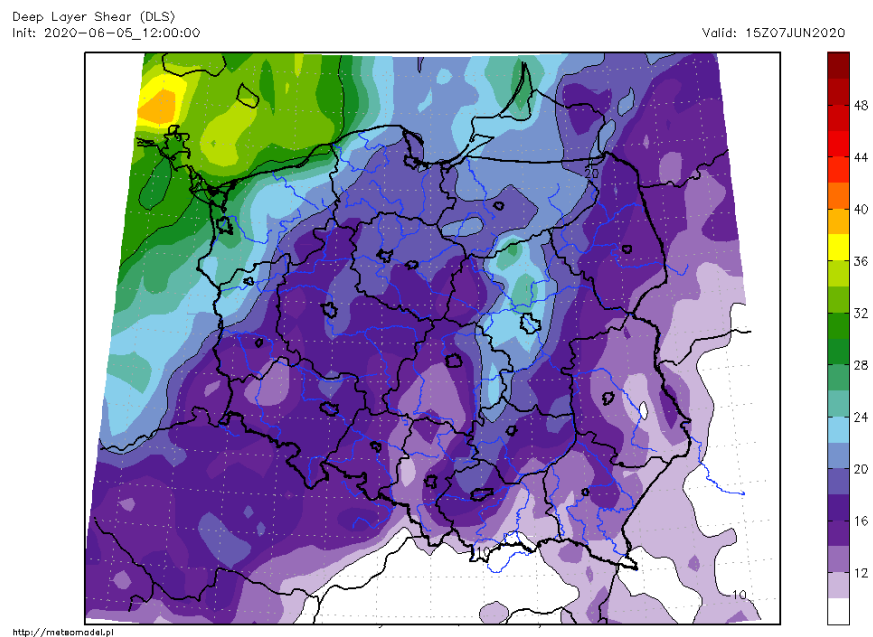
Ryc. 44., Ryc. 45. Grafiki przedstawiające prognozę zachmurzenia, opadów i lokalizacji wyładowań atmosferycznych modelu UMPL na dzień 7 czerwca 2020 roku, godzinę 19 CEST. Widoczny był wówczas możliwy rozwój burz, głównie w centralnej i południowo-wschodniej części Polski. Pierwsza aktualizacja wyliczeń pochodzi z godziny 12 UTC 6 czerwca, druga z godziny 6 UTC 7 czerwca. Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>.



Ryc. 46. Obraz radarowy z omawianego dnia dla godziny 17:30 UTC. Widnieje na nim wiele komórek burzowych z obszarami silnej odbiciowości (oznaczonymi pomarańczowym i czerwonym kolorem). W miejscach tych pojawił się silny, intensywny opad deszczu, a miejscami również duży grad. Źródło: <https://czypada.pl/>.

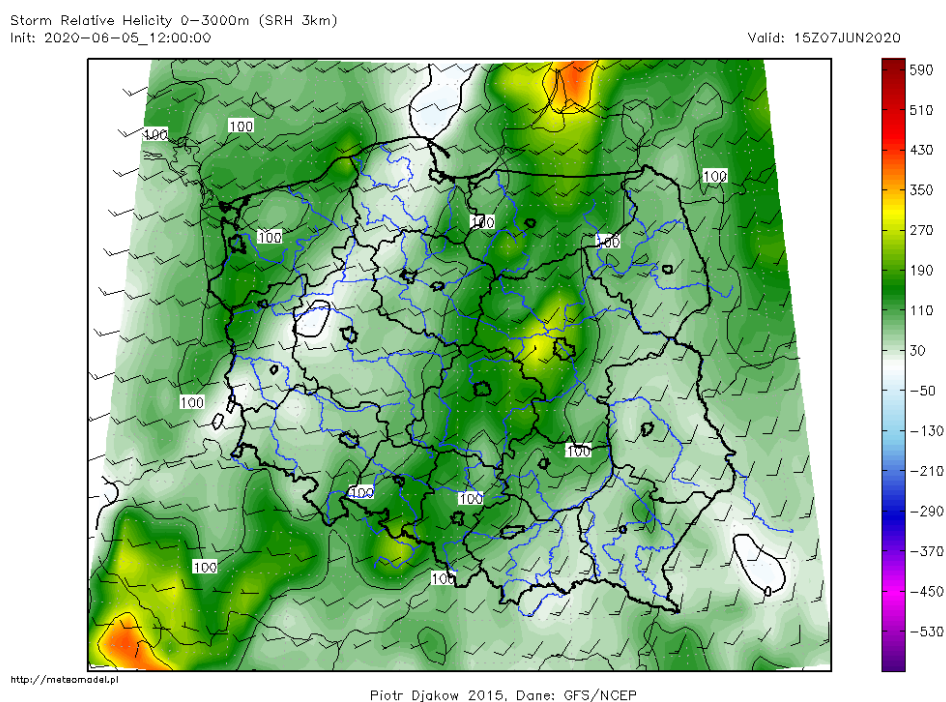


Ryc. 47. Obliczenia modelu numerycznego GFS 0.25 przedstawiające energię CAPE (J/kg) i parametr Lifted Index (°C) na godz. 15 UTC 7 czerwca (z aktualizacji zainicjowanej 3 czerwca o godzinie 18 UTC). Jak widać na powyższej grafice, sygnalizacja warunków atmosferycznych umożliwiających rozwój burz w południowo-wschodniej części kraju pojawiała się co najmniej 5 dni przed spodziewanym terminem ich wystąpienia. Źródło: <https://www.wxcharts.com/>.



Ryc. 48. Obliczenia modelu numerycznego GFS 0.25° przedstawiające uskok wiatru w warstwie 0-6 km (SHEAR 0-6 km) dla aktualizacji zainicjowanej 5 czerwca o godzinie 12 UTC. Na grafice widoczny jest obszar **umiarkowanego pionowego** **ścianania wiatru** z największymi wartościami (do około 20-25 m/s) w województwie łódzkim i Mazowieckim.

Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/DLS/00>.

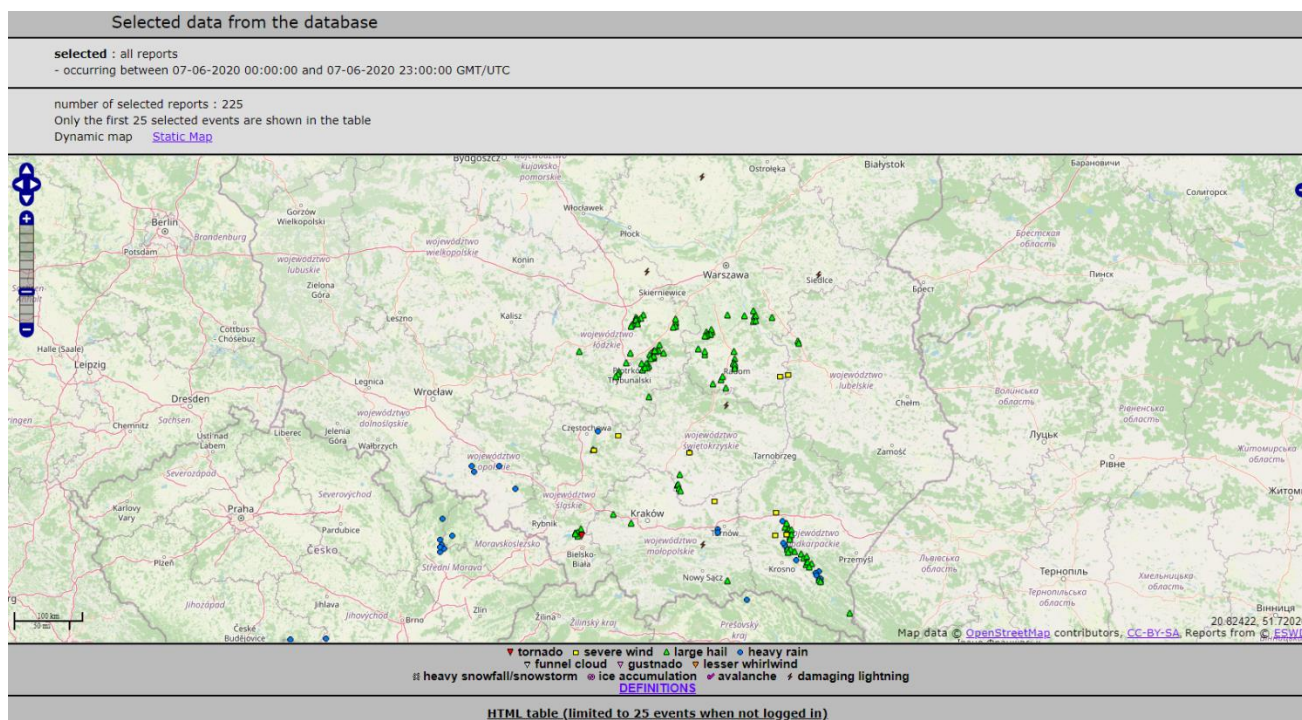


Ryc. 49. Obliczenia przedstawiające parametr *Storm Relative Helicity* (SRH) w warstwie 0-3 km dla aktualizacji zainicjowanej 5 czerwca o godz. 12 UTC. Najwyższe wartości tego parametru (ok. 100-250 m^2/s^2) wyliczane były w pasie od woj. opolskiego i śląskiego przez woj. łódzkie, woj. mazowieckie po woj. warmińsko-mazurskie.

Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/SRH3/00>.



Ryc. 50. Zdjęcie superkomórki burzowej zaobserwowanej 7 czerwca 2020 r. w okolicy Tomaszowa Mazowieckiego (woj. łódzkie). Burza ta wygenerowała opady gradu o średnicy sięgającej 5 cm. Fot. Dawid Stępczyński.



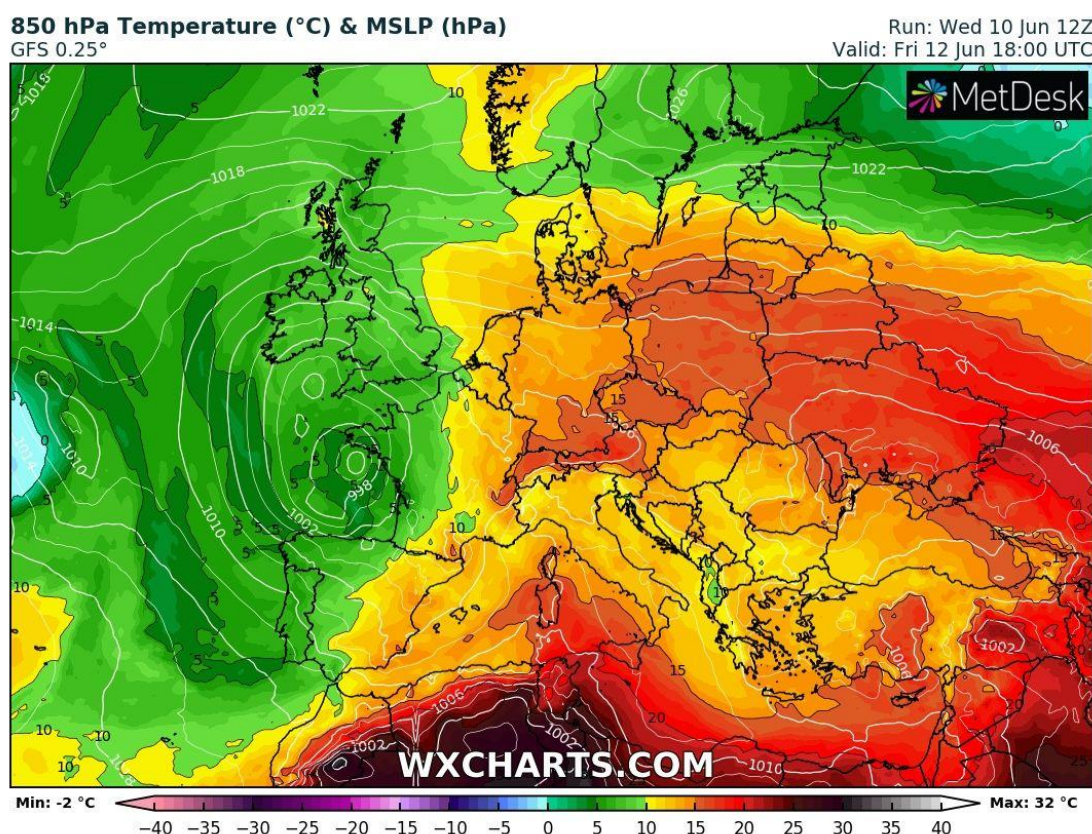
Ryc. 51. Zrzut ekranu przedstawiający raporty zgłoszone do Europejskiej Bazy o Gwałtownych Zjawiskach Atmosferycznych (ESWD) z 7 czerwca 2020 r. Najwyższa ilość zgłoszeń dotyczyła opadów dużego gradu. Największa ich koncentracja widoczna jest we wschodniej części województwa łódzkiego i południowej części województwa mazowieckiego.

Źródło: <https://www.eswd.eu/>.

Warto podkreślić, że model numeryczny GFS „wyciął” największą chwiejność na wschód od miejsca gdzie rozwinęły się najsilniejsze burze. W obszarze centralnej Polski większe wartości uskoków wiatru doprowadziły do lepszej organizacji i większej aktywności komórek burzowych.

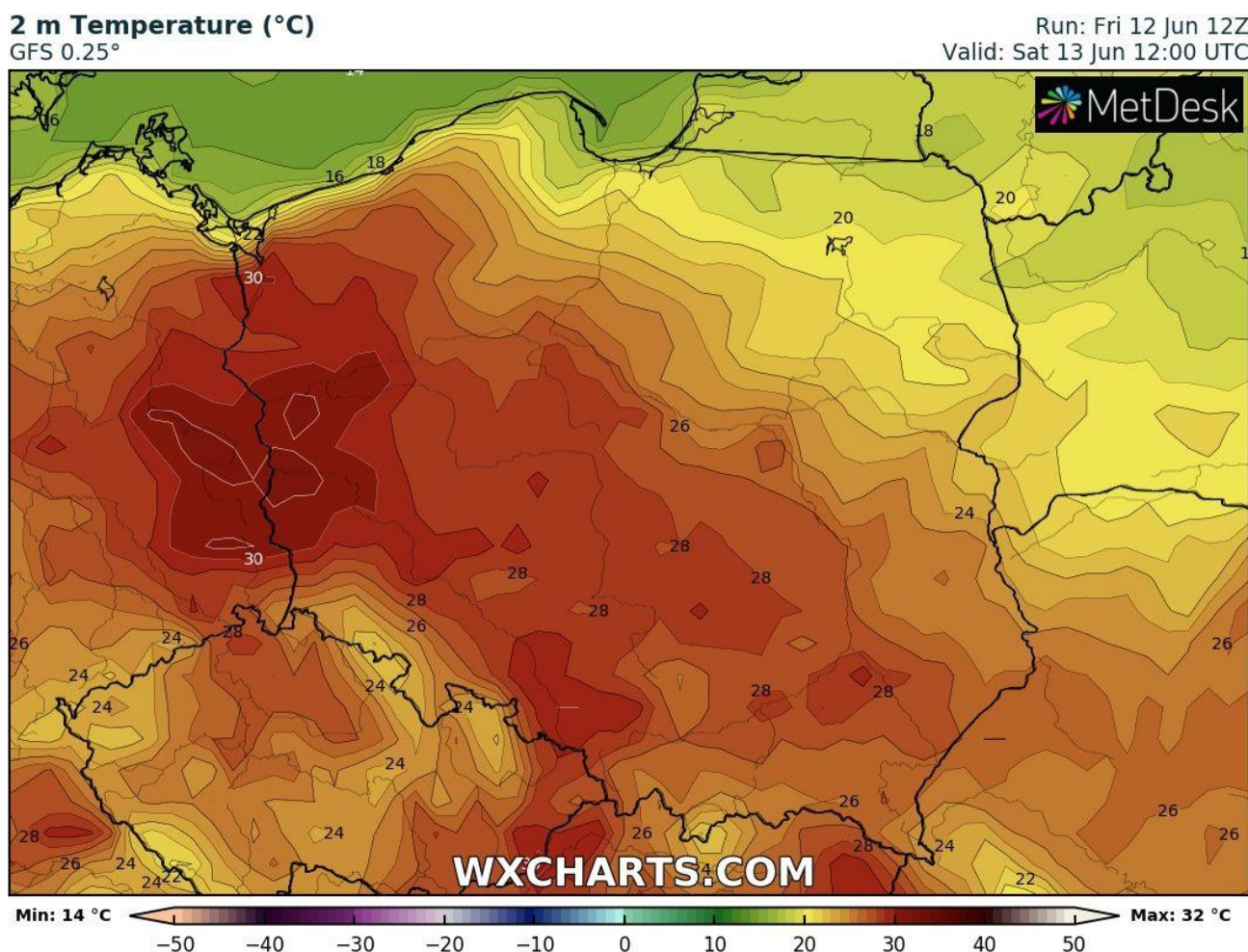
PRZYKŁAD 3a PROGNOZOWANY NAPŁYW ZWROTNIKOWEJ MASY POWIETRZA DO ZA- CHODNIEJ CZĘŚCI POLSKI.

13 czerwca wyniki obliczeń modeli numerycznych wskazywały na wystąpienie po południu upału ($>30^{\circ}\text{C}$) na znacznym obszarze Polski. Na powierzchni izobarycznej 850 hPa (ok. 1.5 km nad gruntem) temperatura powietrza miała osiągnąć na omawianym obszarze ok. 15°C . Latem takie wartości mogą oznaczać wystąpienie upału przy powierzchni ziemi (szczególnie podczas pogodnego nieba oraz nasłonecznienia w ciągu dnia). W rezultacie, wśród stacji należących do sieci IMGW-PIB, najwyższą temperaturę powietrza na wysokości 2 metrów nad powierzchnią gruntu odnotowano w Słubicach w woj. lubuskim, gdzie o godz. 13 UTC zmierzono $32,9^{\circ}\text{C}$.



Ryc. 52. Obliczenia modelu GFS przedstawiające temperaturę powietrza na powierzchni izobarycznej 850 hPa oraz ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza na 12 czerwca 2020 r., godz. 18 UTC. Wyliczenia numeryczne przedstawiały napływ bardzo ciepłej masy powietrza z kierunku południowo-wschodniego. Źródło grafiki: <https://www.wxcharts.com/>.

Jak już wspomniano w rozdziale pierwszym prognoza temperatury powietrza dla „wysokości” 850 hPa (ok. 1.5 km nad poziomem gruntu) bardzo dobrze ilustruje zasięg danych mas powietrza różniących się temperaturą. Świadczy o tym powyższa grafika (ryc. 52).



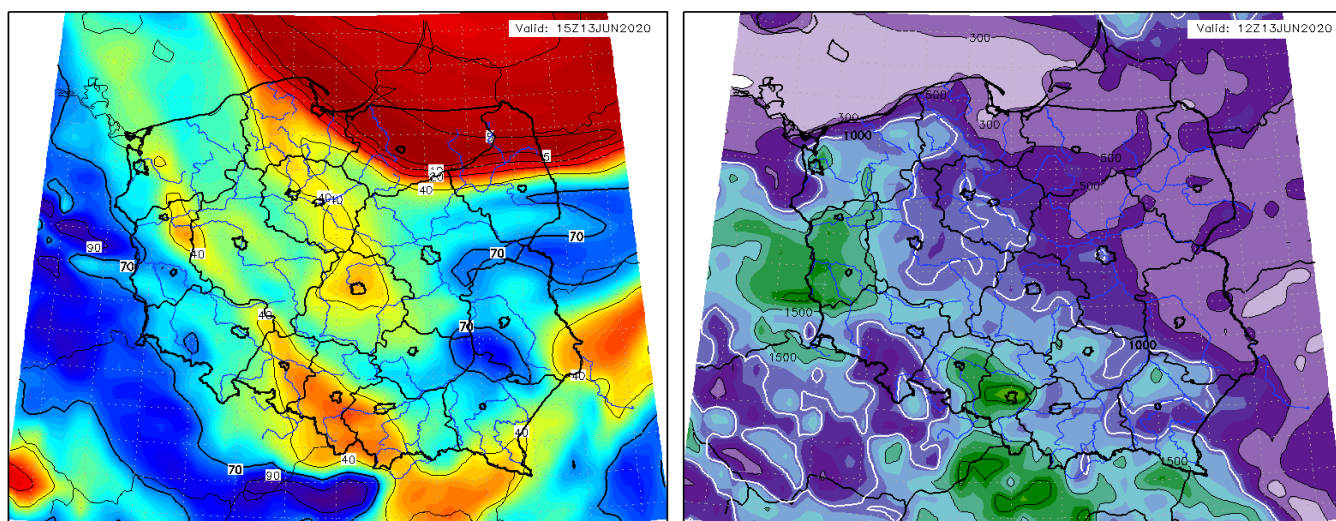
Ryc. 53. Obliczana przez model GFS 0.25° temperatura powietrza dla wysokości 2m nad powierzchnią gruntu dla 13 czerwca 2020r., godz. 12 UTC (z aktualizacji zainicjowanej 12 czerwca o godzinie 12 UTC).

Źródło grafiki: <https://www.wxcharts.com/>

Na powierzchni izobarycznej 850 hPa (ok. 1.5 km nad gruntem) dominujący wpływ na rozkład przestrzenny temperatury powietrza ma cyrkulacja atmosferyczna, a nie podłoże. W rezultacie przy zaleganiu jednorodnej masy powietrza nad danym obszarem, na omawianej wysokości nie notuje się różnic dobowych temperatury powietrza (tak jak ma to miejsce przy powierzchni ziemi przy silnym nagrzewaniu i wychładzaniu gruntu).

Przykład 3b –STACJONARNA KOMÓRKA BURZOWA NAD GORZOWEM WIELKOPOLSKIM, ZALANIA I PODTOPIENIA.

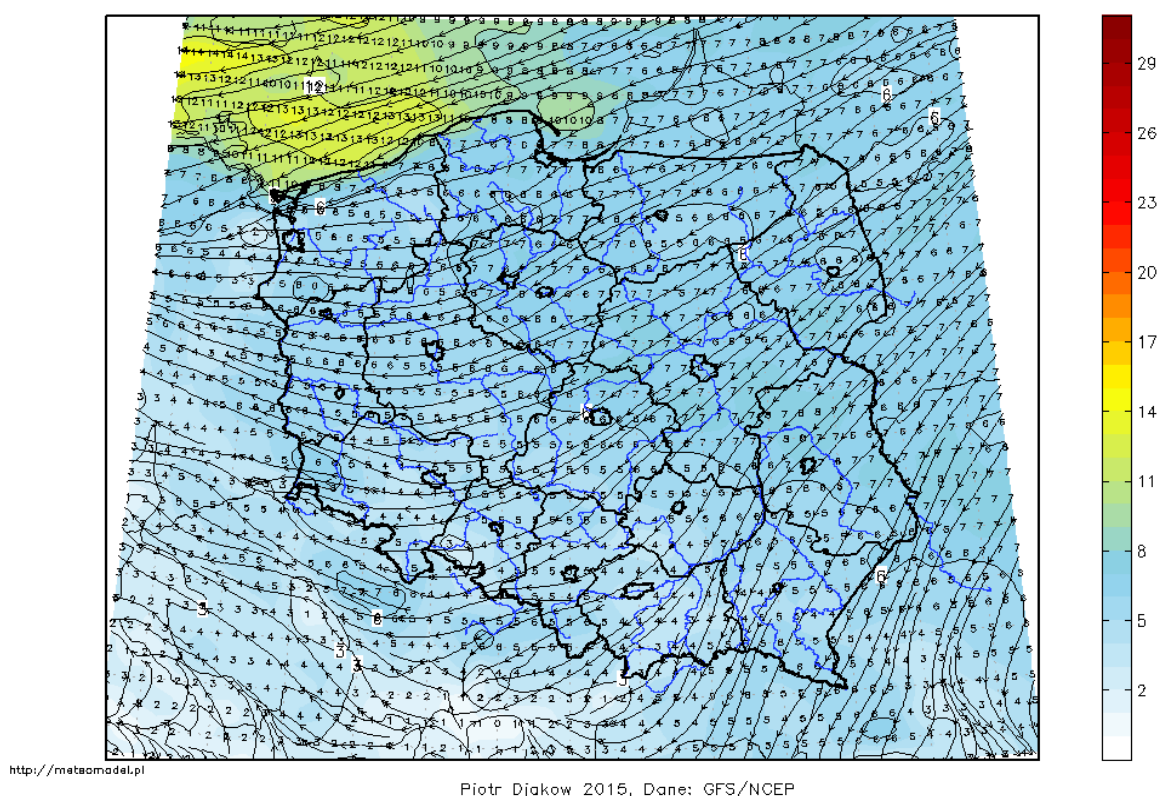
W tym samym dniu, 13 czerwca 2020 r. w ciepłej masie powietrza pojawiła się **bardzo duża ilość energii potencjalnej dostępnej konwekcyjnie (CAPE)** oscylująca w **granicach 2500 – 3000 J/kg**. Początkowo obliczenia sugerowały znacznie ograniczenie potencjału do rozwoju burz poprzez niedosyt wilgoci w środkowej i dolnej troposferze (napływ bardzo ciepłej ale suchej warstwy powietrza) oraz wysoki poziom kondensacji pary wodnej hamujący rozwój konwekcji w zachodniej części Polski (grafiki poniżej).



Ryc. 54., Ryc. 55. Obliczana wilgotność względna na powierzchni izobarycznej 750 hPa (ok. 3 km nad gruntem) po lewej; oraz wysokość poziomu kondensacji pary wodnej > 1500 m po prawej. Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/T2M/00>

Prędkość wiatru w dolnej i środkowej części troposfery była w tym dniu **bardzo niewielka**, co sugerowało możliwość rozwoju potencjalnych komórek burzowych w formie quasi stacjonarnej³⁵ przemieszczających się w bardzo niewielkim tempie ze wschodu na zachód lub stacjonujących przez dłuższy czas nad jednym miejscem (obraz poniżej). **W takiej sytuacji zagrożeniem ze strony burz są ulewne opady deszczu doprowadzające do zalań czy podtopień, a nawet powodzi błyskawicznych.**

³⁵ Burze w formie quasi-stacjonarnej cechuje niewielka prędkość przemieszczania się. Najczęściej rozwijają się one wewnątrz jednolitej masy powietrza na lokalnych liniach konwergencji (zbieżności) wiatru.



Ryc. 55. Obliczana przez model GFS średnia prędkość oraz kierunek wiatru (w tym przypadku wschodni) na wysokości 10 m n.p.g., dla 13 czerwca 2020 r. Źródło: <https://meteomodel.pl/gfs-para/T2M/00>.

Po godzinie 12:00 na lokalnej zbieżności wiatru w okolicach Gorzowa Wielkopolskiego (woj. lubuskie) rozpoczęła się konwekcja, początkowo skutecznie hamowana przez warstwę zatrzymującą. Na wschód od miasta prądy wstępujące były na tyle silne, że zdołały utworzyć początkowo niemal stacjonarną komórkę burzową, która wkroczyła nad obszar miasta i w miarę upływu czasu zaczęły pojawiać się pierwsze utrudnienia. Przez długi czas burza stacjonowała w jednym miejscu na północy Gorzowa, doprowadzając do licznych podtopień.

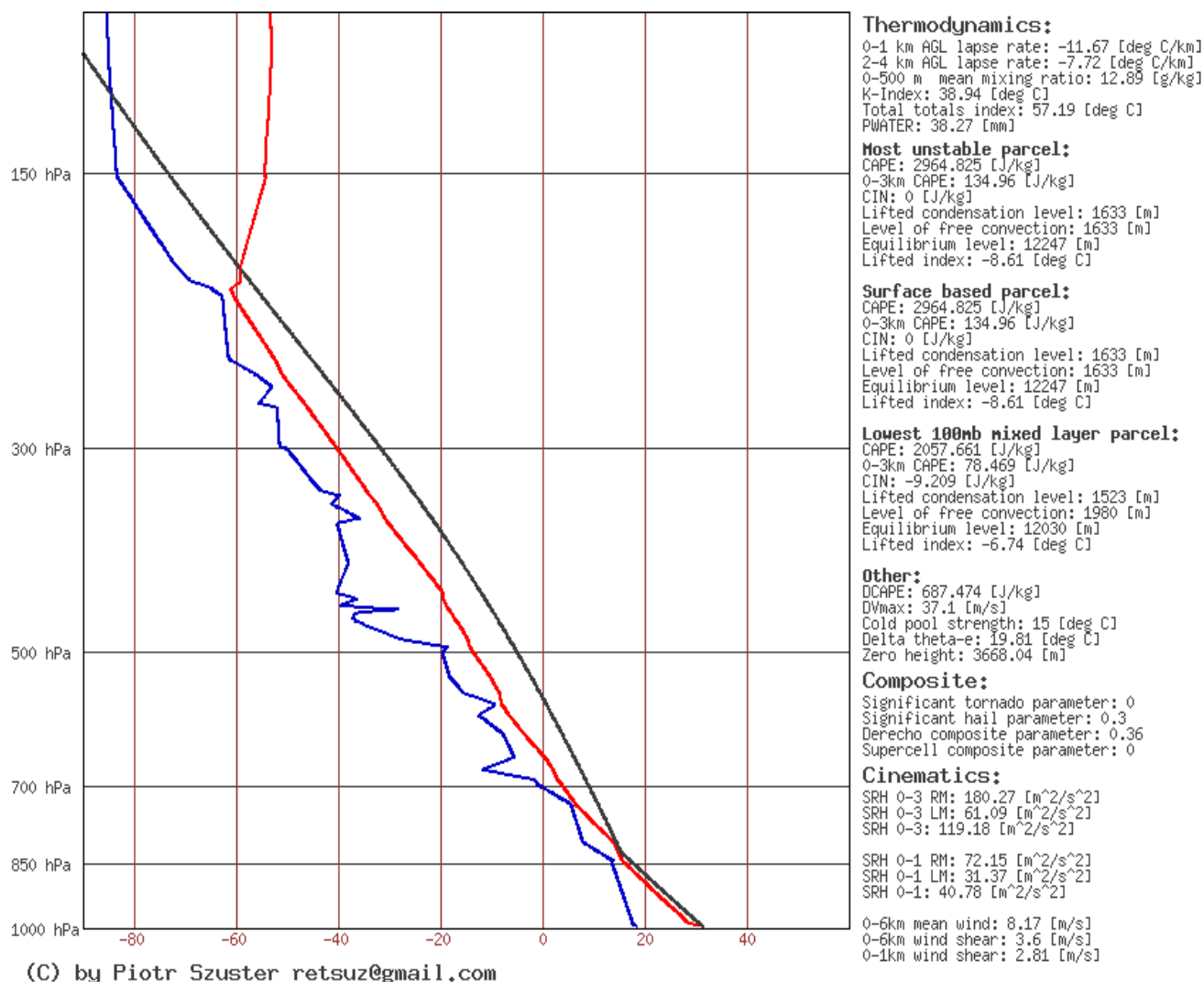


Ryc. 56., Ryc. 57. Podtopienia w Gorzowie Wielkopolskim. Źródło: ¹⁾fot. Patryk Matczak (zdjęcie autorskie); ²⁾fot. gorzowianin.com



Ryc. 58, Ryc. 59. Zalane ulice Gorzowa Wielkopolskiego. Źródło:³⁾ ⁴⁾ fot. gorzowianin.com

łącznie podczas burzy spadło 66,6 mm deszczu (z czego ponad 40 mm w godzinę), i był to opad większy niż wystąpił przez cały marzec, kwiecień i maj łącznie! ($28,9 \text{ mm} + 6,3 \text{ mm} + 30,3 \text{ mm} = 65,5 \text{ mm}$). Dane o sumach opadów pochodzą ze stacji synoptycznej IMGW-PIB umiejscowionej w Gorzowie Wielkopolskim. Oprócz deszczu przez kilka minut pojawiły się, także opady małego gradu o średnicy ok. 0,5 - 1 cm. Odnotowano około 80 interwencji Straży Pożarnej.

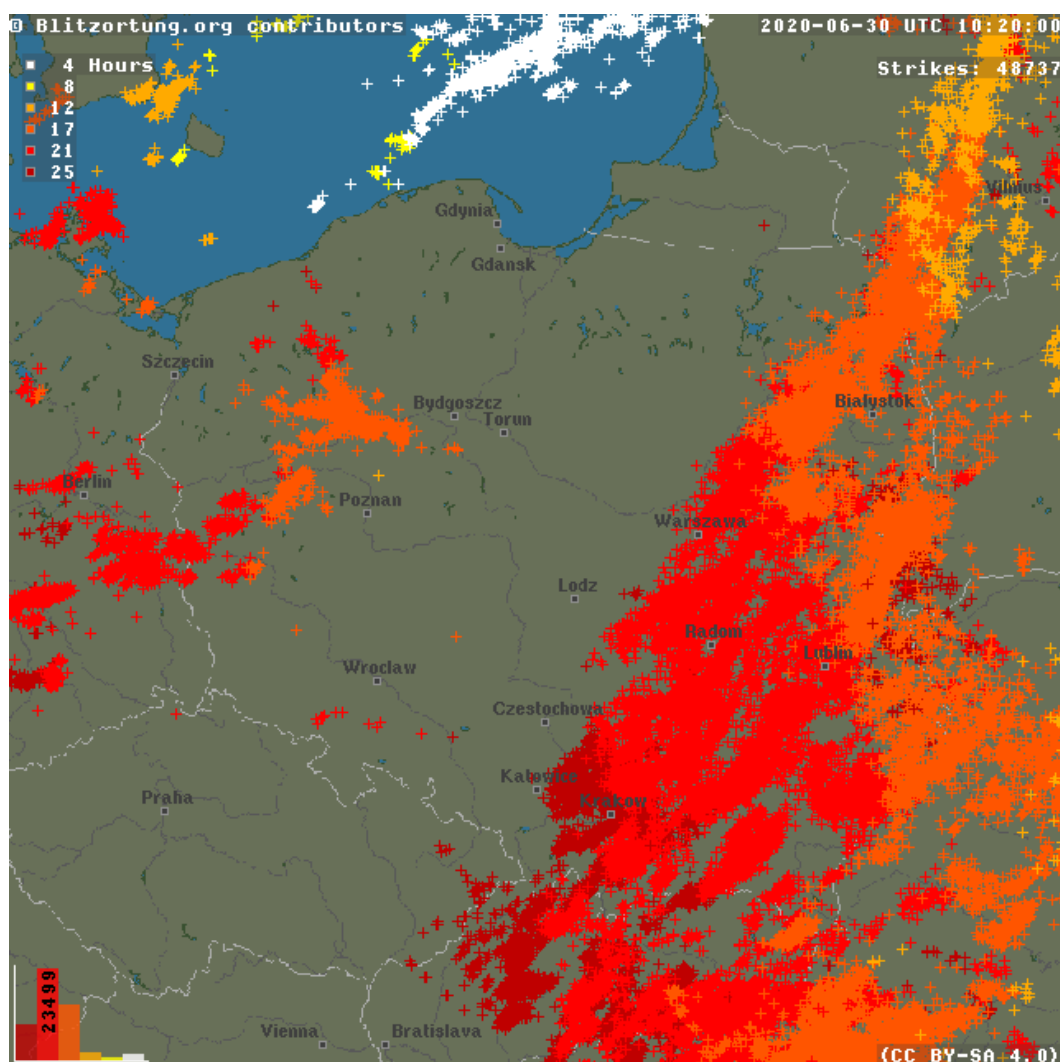


Ryc. 60. Sondaż aerologiczny z miejscowości Lindenberg położonej ok.220 km od Gorzowa Wielkopolskiego. **Chwiejność** termodynamiczna z najbardziej niestabilnej warstwy troposfery (MUCAPE) osiągnęła 2964 j/kg. Uskok prędkościowy wiatru z warstwy 0-6 km nad gruntem był niewielki i wyniósł 3,6 m/s. Wystąpiły, więc bardzo dogodne warunki do powstawania burz quasi-stacjonarnych.

Źródło: <http://retsuz.pl/soundings/index.php>

PRZYKŁAD 4 PROGNOZOWANE SILNE BURZE NA TERENIE CENTRALNEJ I WSCHODNIEJ POLSKI 29 CZERWCA 2020.

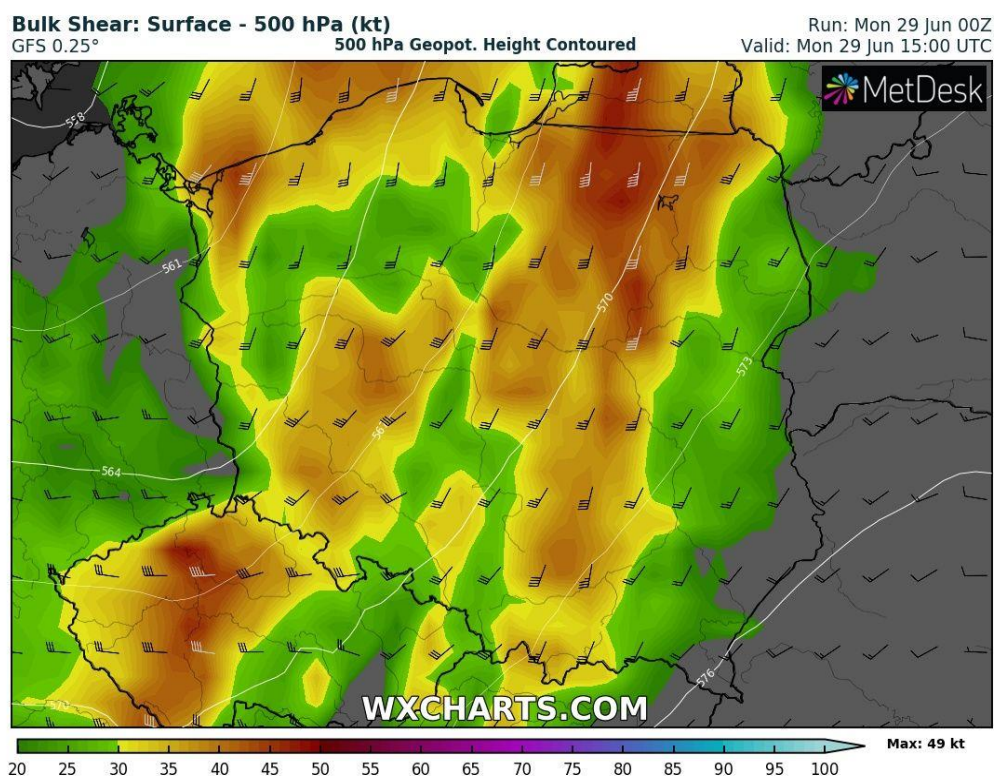
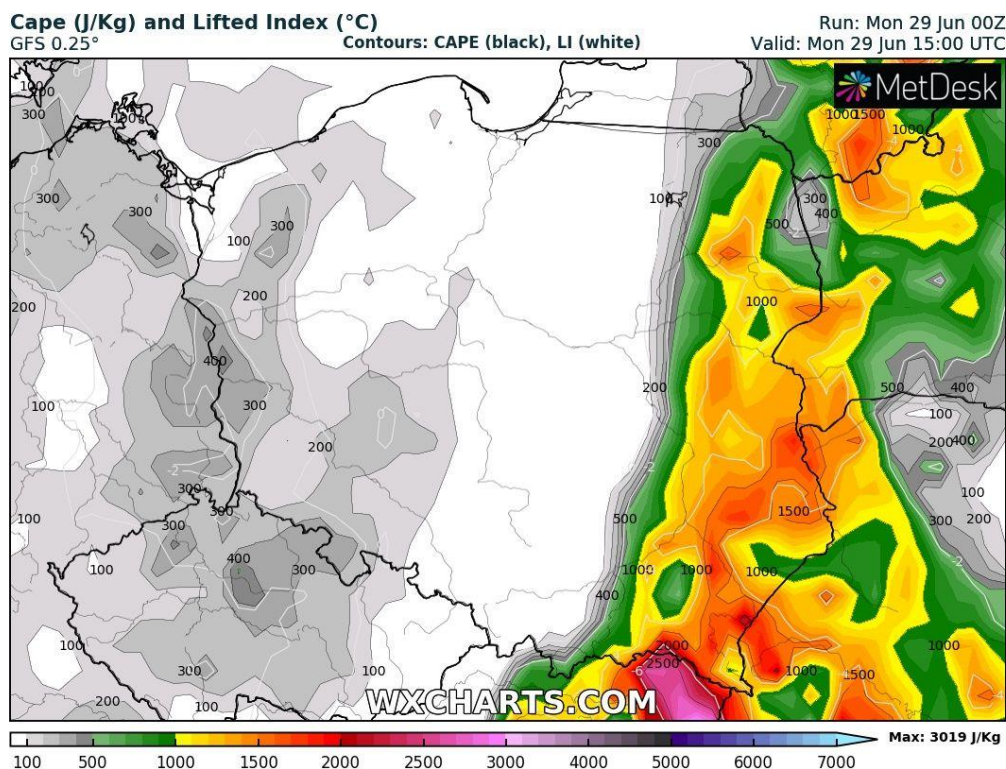
29 czerwca przez Polskę miał przechodzić chłodny front atmosferyczny. Wyliczenia modeli numerycznych wskazywały na rozwój burz w jego obrębie.



Ryc. 61. Grafika przedstawiająca wyładowania atmosferyczne wykryte przez sieć stacji detekcji Blitzortung 29 czerwca 2020 roku. Można zauważyć, że chmury „burzowe” zaczęły przynosić wyładowania atmosferyczne w okolicy chłodnego frontu atmosferycznego przebiegającego od Górnego Śląska, przez Ziemię Łódzką po Mazowsze. Następnie powędrowały one dalej w kierunku północno-wschodnim. Widoczny jest, także rozwój słabych, lokalnych burz adwekcyjnych³⁶ za chłodnym frontem, w północno-zachodniej Polsce oraz wschodnich Niemczech w chłodniejszej masie powietrza.

Źródło grafiki: <https://www.blitzortung.org/>

³⁶ Burze adwekcyjne formują się najczęściej za chłodnym frontem atmosferycznym i przyjmują zazwyczaj słabo zorganizowaną formę.

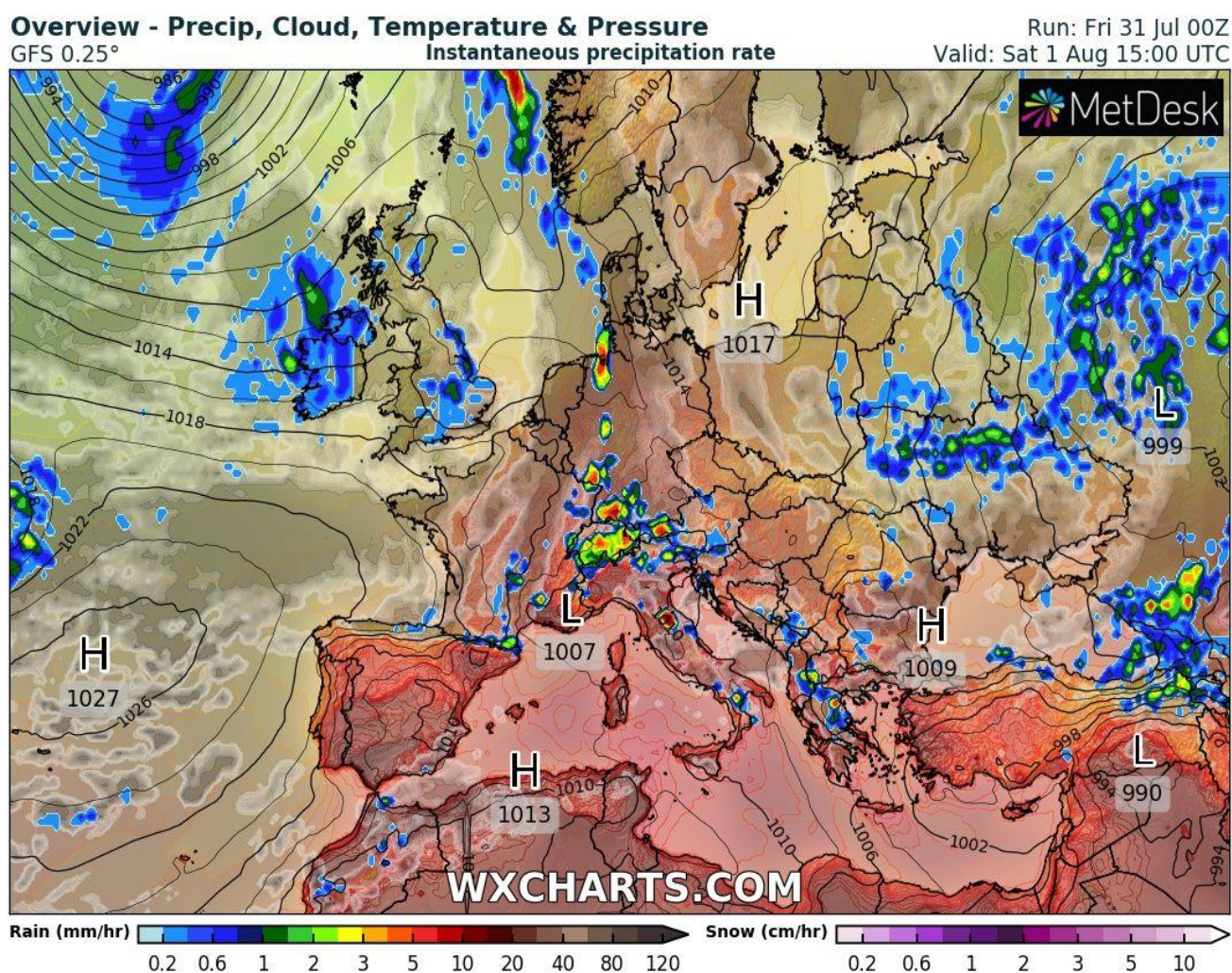


Ryc. 62, Ryc. 63. Grafiki przedstawiające prognozowane obliczenia modelu GFS obejmujące podstawowe parametry wpływające na aktywność burz- chwiejność termodynamiczną (CAPE) oraz uskok wiatru (SHEAR) z warstwy 0-6 km n.p.g. na 29 czerwca 2020 roku, godzinę 15 UTC. Na wschodzie Polski, umiarkowanie ścinanie wiatru miało pokryć się z umiarkowaną chwiejnością termodynamiczną. Źródło grafiki: <https://www.wxcharts.com/>

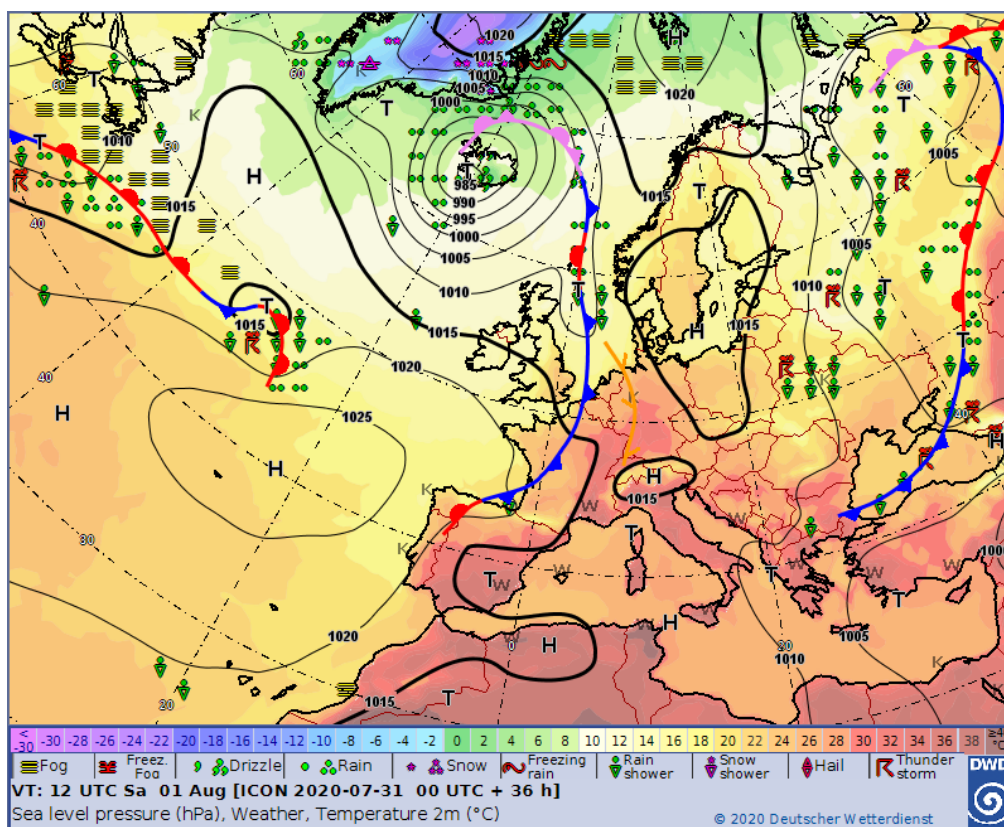
PRZYKŁAD 5 PROGNOZA POGODY NA 1 SIERPNIA 2020 R. DLA DWÓCH WYBRANYCH LOKALIZACJI W POLSCE I ICH POKRYCIE Z RZECZYWISTOŚCIĄ.

- Sytuacja synoptyczna

Wyliczenia modeli numerycznych wskazywały, że 1 sierpnia wpływ na pogodę w Polsce będzie mieć wyż z centrum umiejscowionym nad Morzem Bałtyckim.

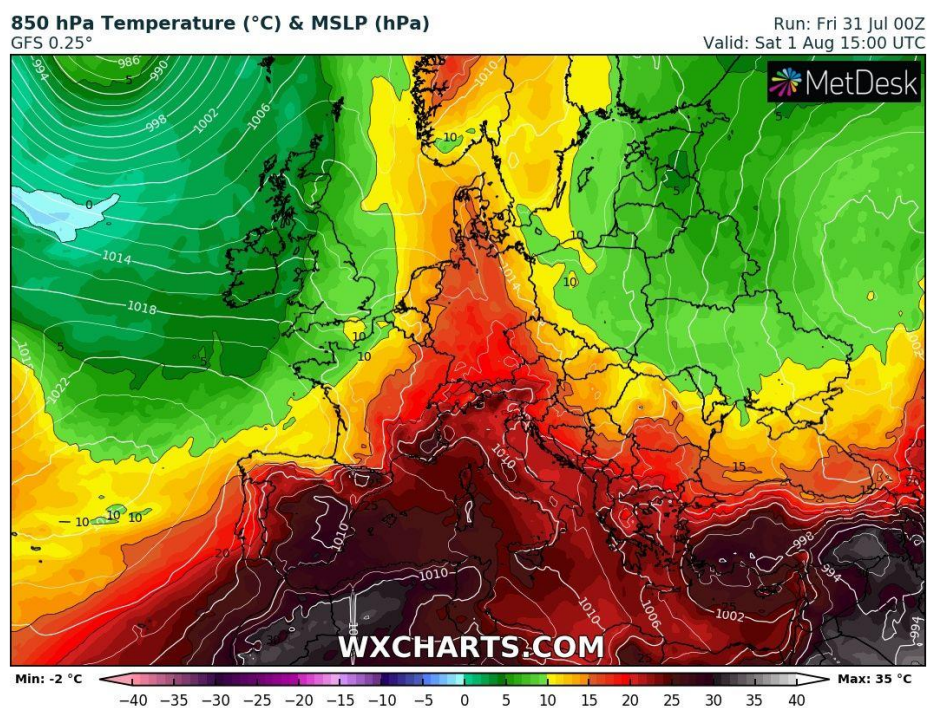


Ryc. 68. Wyliczone przez model GFS rozlokowanie ośrodków barycznych nad Europą. Źródło: <https://www.wxcharts.com/>



Ryc. 69. Prognozowana mapa synoptyczna na 1 sierpnia 12 UTC na podstawie wyliczeń modelu numerycznego ICON z 31 lipca godz. 00 UTC. Na zachód od wyżu ulokowanego w południowej części Morza Bałtyckiego, w zachodniej Europie znaleźć miał się front chłodny związany z niżem znad Morza Północnego.

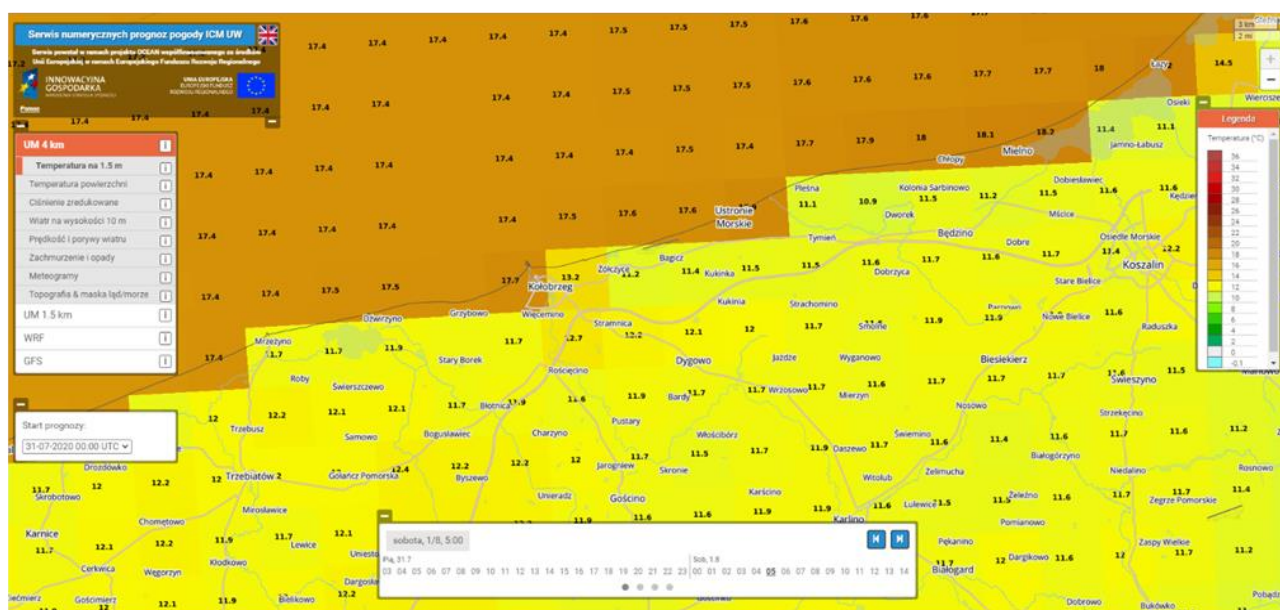
Źródło grafiki: https://www.dwd.de/DE/leistungen/hobbymet_wk_europa/hobbyeuropakarten.html



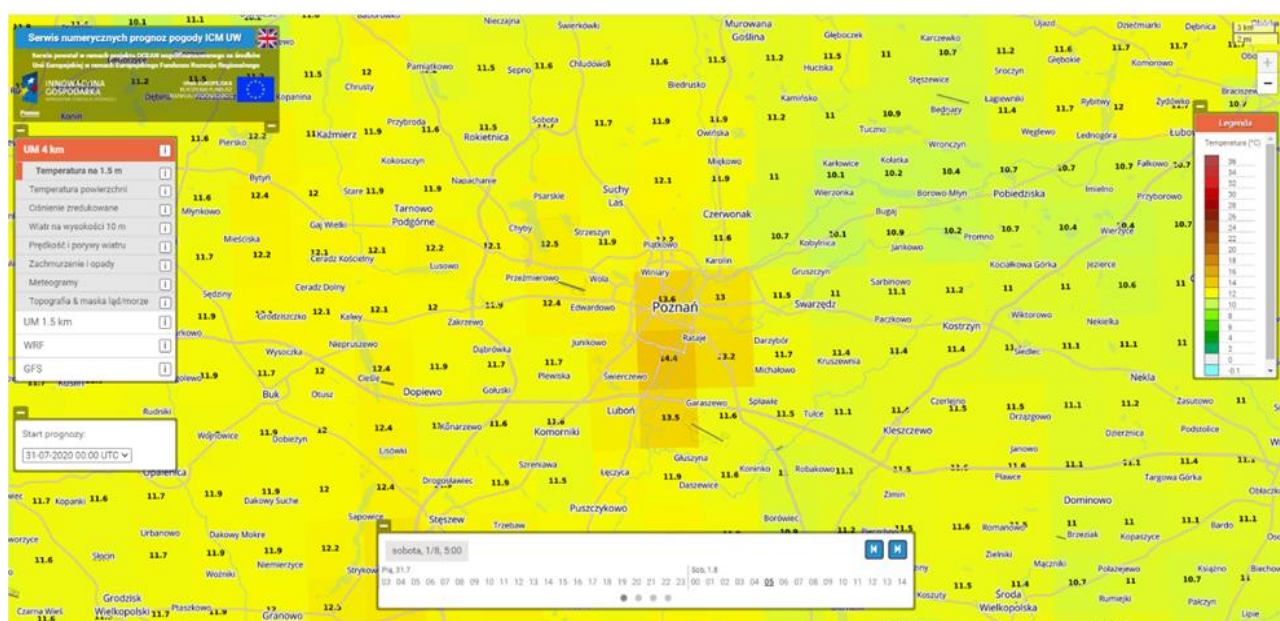
Ryc. 70. Przed frontem chłodnym wyraźna była adwekcja cieplejszej masy powietrza z kierunku południowego.

Źródło: <https://www.wxcharts.com/>

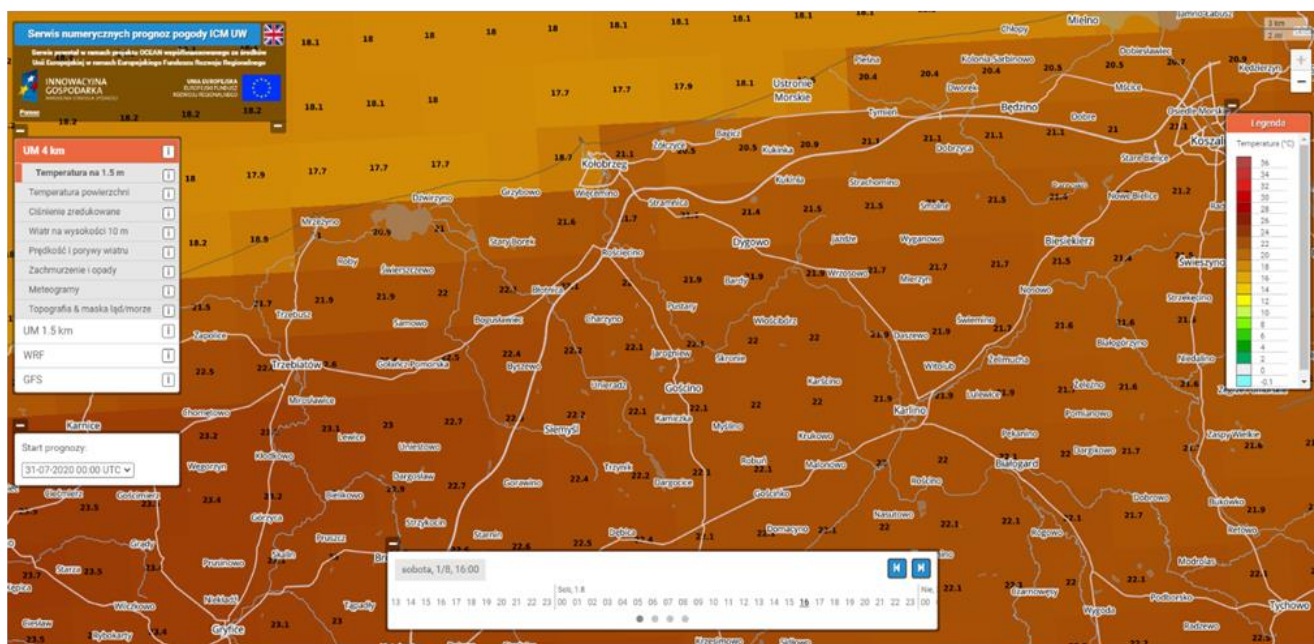
- Omówienie przewidywanych wartości temperatury powietrza, zachmurzenia, opadów, wiatru wskazywanych przez modele numeryczne dla Kołobrzegu i Poznania.



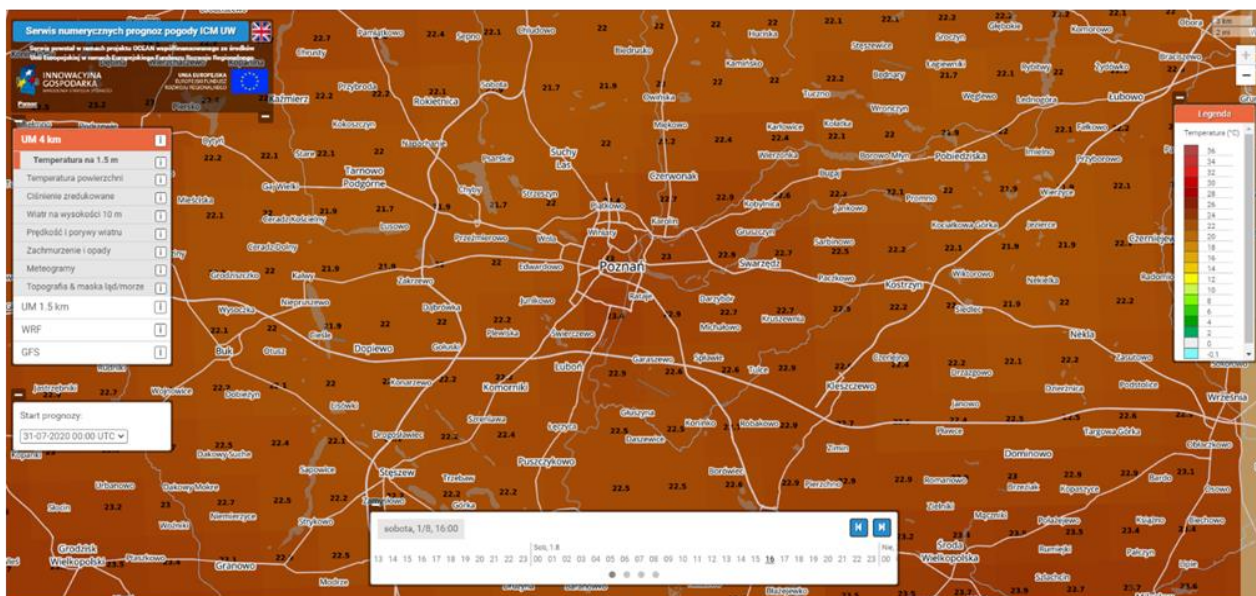
Ryc. 71. Według obliczeń modelu UMPL 4km temperatura minimalna w Kołobrzegu (woj. zachodniopomorskie) i pobliskim regionie miała osiągnąć ok.12-13°C. Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>



Ryc. 72. Dla Poznania (woj. wielkopolskie) wyliczenia były podobne. Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>



Ryc. 73. Obliczana przez model UMPL 4km maksymalna temperatura odnotowana późnym-popołudniem osiągnąć miała w Kołobrzegu około 21-22°C. Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>

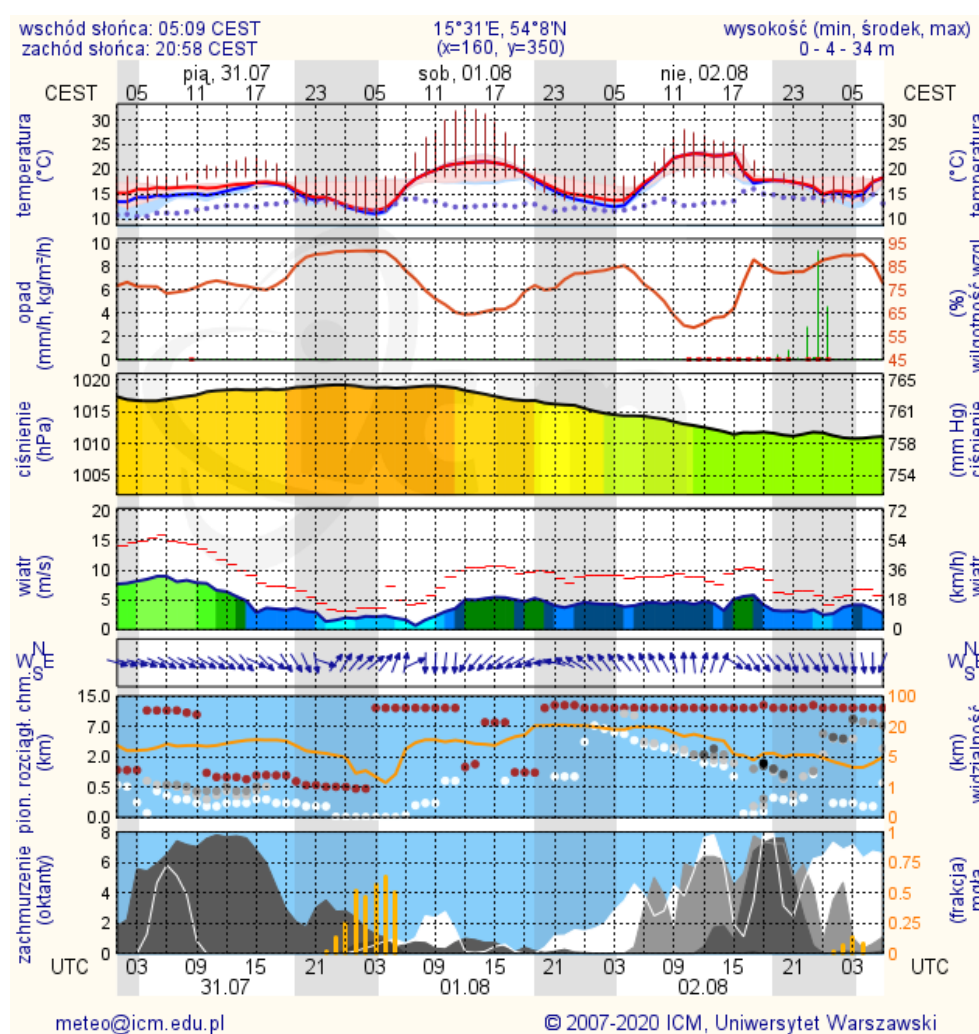


Ryc. 74. Obliczana przez model UMPL 4km maksymalna temperatura odnotowana późnym-popołudniem osiągnąć miała stolicy Wielkopolski około 23°C.
Źródło: <http://mapy.meteo.pl/>

Obliczane przez modele numeryczne wartości różnych elementów meteorologicznych dla danego czasu i miejsca można przedstawić w formie tzw. **meteogramu**. Każdy meteogram ma przypisaną dokładną lokalizację, która oparta jest o długość i szerokość geograficzną oraz wysokość nad poziomem morza.

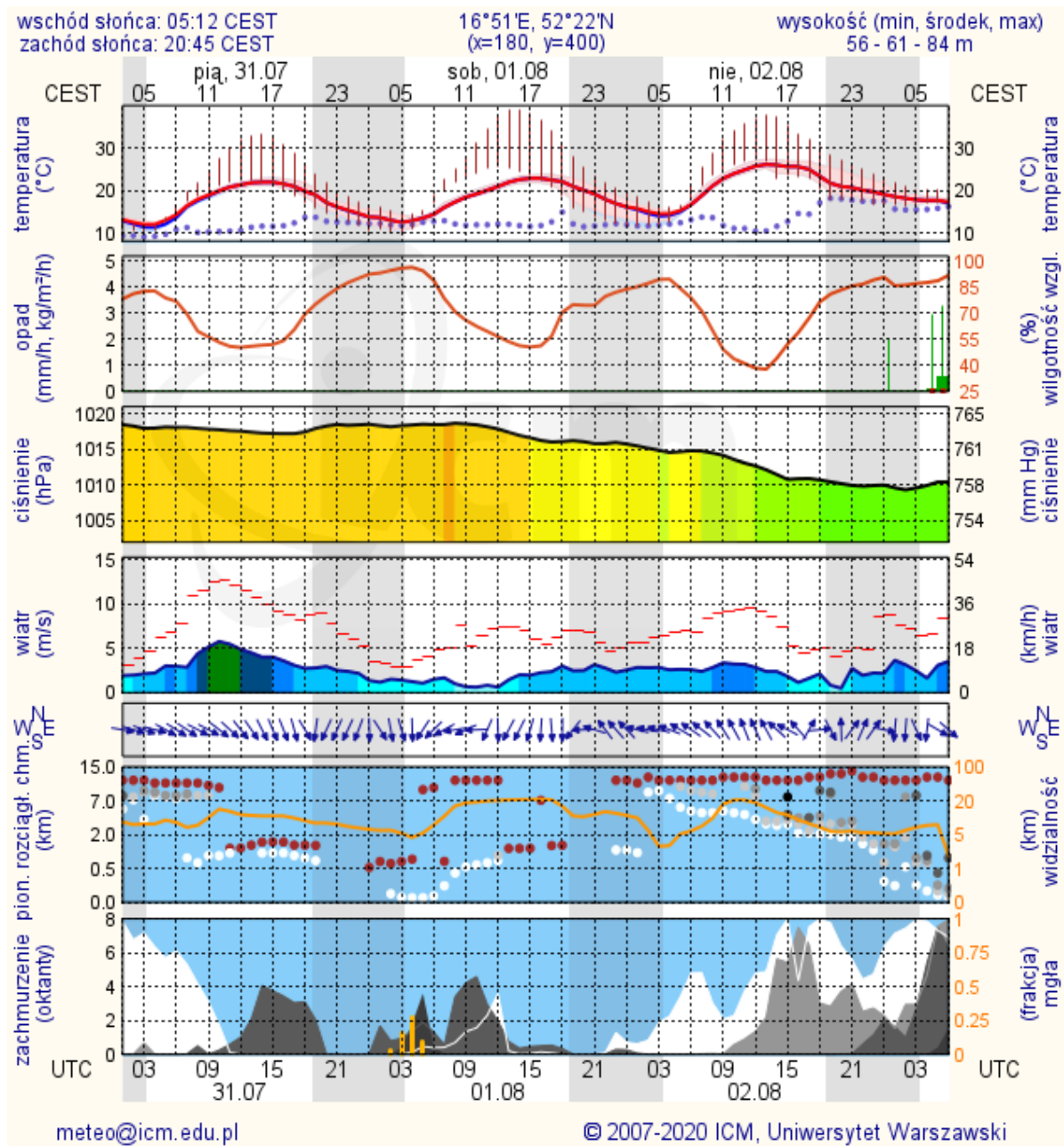
Oś pionowa przedstawia termin na który obowiązują wyliczenia, natomiast pozioma określone wielkości parametrów (stopień zachmurzenia, prędkość i kierunek wiatru, rodzaj i natężenie opadu itd.). Poprzez poprawną analizę osi poziomej (z lewej do prawej strony) poznajemy przewidywaną zmienność stanów atmosfery w czasie dla jednego, konkretnie wybranego punktu.

Jednym z najczęściej stosowanych w praktyce meteogramów, jest meteogram modelu UMPL...

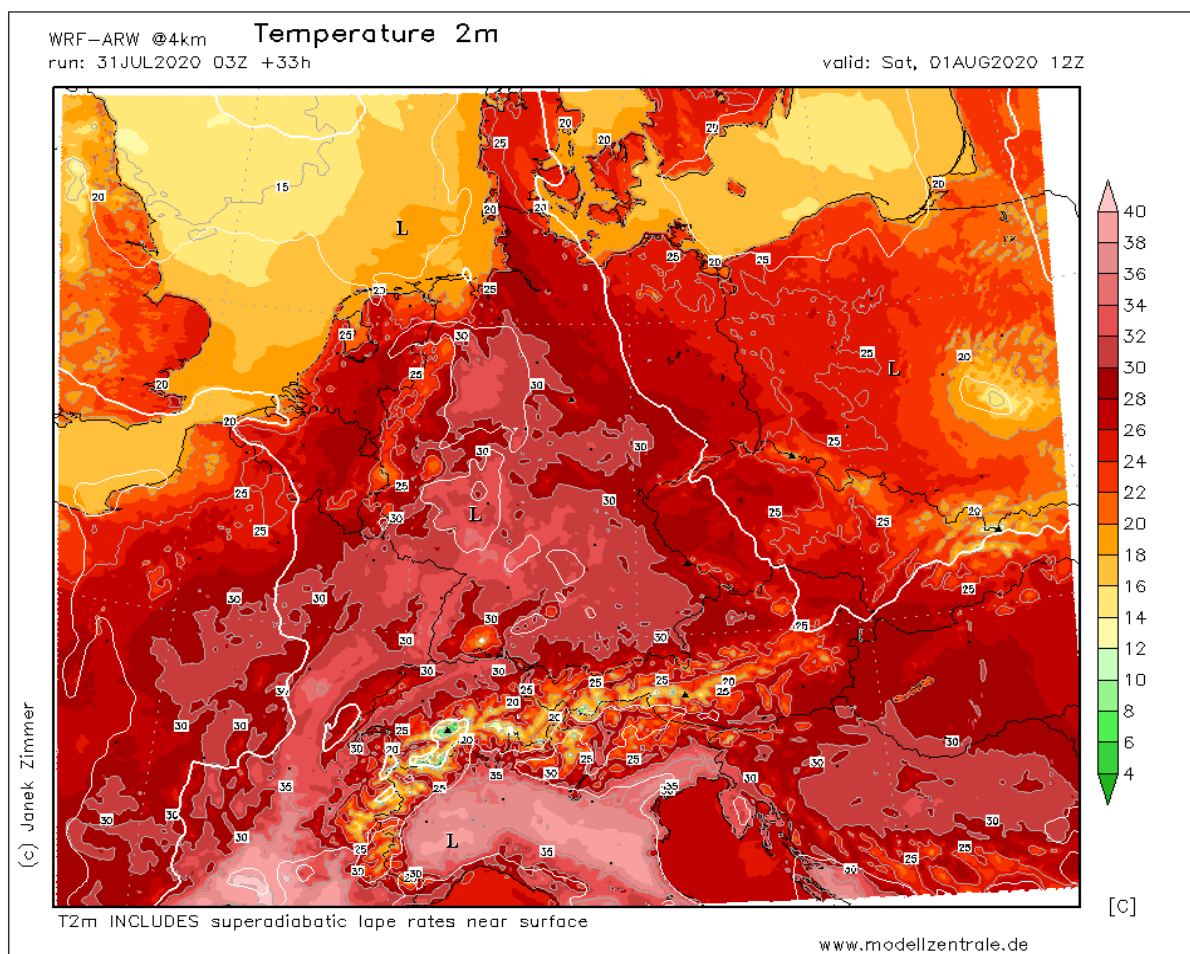


Ryc. 75. Meteogram modelu UMPL z wyliczeniami dla Kołobrzegu. Zgodnie z zaprezentowanymi wyliczeniami, 1 sierpnia w Kołobrzegu miało panować pogodne niebo (do 2/8 oktantów), umiarkowany wiatr (do 5 m/s) w porywach do 10 m/s i temperatura powietrza dochodząca do ok.21°C. Nie były prognozowane opady. Źródło grafiki:

<http://m.meteo.pl/kolobrzeg/60>



Ryc. 76. Meteogram modelu UMPL z wyliczeniami dla Poznania. W pierwszej części dnia zachmurzenie miało wzrosnąć do stopnia umiarkowanego (do 4/8 oktantów), natomiast popołudniu wystąpić miał jego spadek i pogodne niebo. Obliczenia przedstawiały słabą średnią prędkość wiatru (do 3 m/s). Temperatura maksymalnie osiągnąć miała ok. 22-23°C. Nie były prognozowane opady. Źródło grafiki: <https://m.meteo.pl/poznan/60>



GRADS: COLA/IGES

2020-07-31-08:14

Ryc. 77. Wyliczenia modelu numerycznego WRF wskazywały na wystąpienie wyższej temperatury powietrza, dochodzącej w Poznaniu popołudniu nawet do 25°C. Źródło grafiki: <http://www.modellzentrale.de/WRF4km/#0>.

Podsumowując, 1 sierpień we wskazanych lokalizacjach miał minąć pod znakiem przeważnie pogodnego nieba. Wyż znad Morza Bałtyckiego zapewnić miał stabilną (stałą) równowagę pionową atmosfery, bez zdolności do rozwoju ruchów pionowych, powstawania chmur konwekcyjnych i opadów.

Jak było w rzeczywistości ?

Na stacji IMGW w pobliskim Dźwirzynie temperatura minimalna została odnotowana o 4 UTC i osiągnęła 9,8°C. Natomiast maksymalna temperatura o godzinie 14 UTC wyniosła 21°C.

Na stacji IMGW umiejscowionej w Poznaniu minimalnie zanotowano o godzinie 4 UTC 10,8°C, natomiast wartość maksymalna o godzinie 15 UTC osiągnęła 26,1°C.

Dla Poznania wyliczenia modeli numerycznych wyraźnie zaniżały temperaturę maksymalną w stosunku do sytuacji rzeczywistej. Jest to cecha charakterystyczna obliczeń przy występowaniu pogody radiacyjnej i silnego nagrzania się przyziemnej warstwy atmosfery przez promienie słoneczne. W obu miejscowościach nie odnotowano opadów atmosferycznych.

Podsumowanie części 2

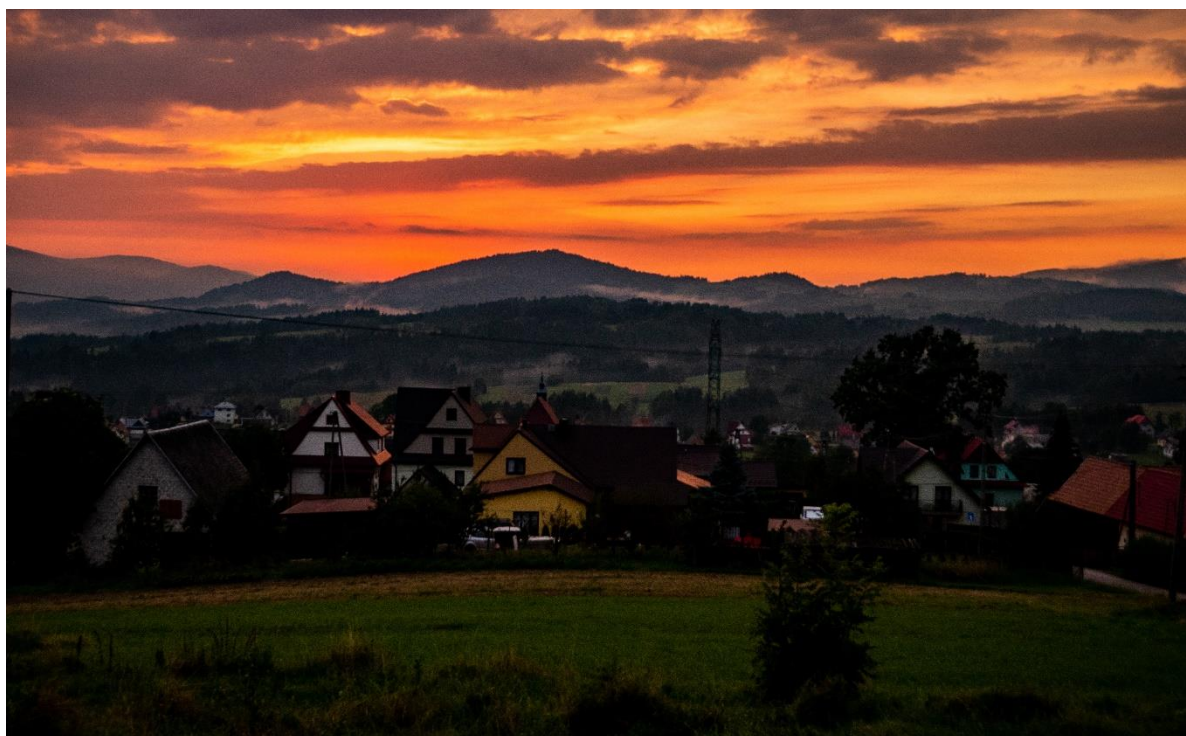
Meteorologia synoptyczna, której głównym zadaniem jest prognozowanie pogody zaczyna mieć dla ogółu społeczeństwa coraz większe znaczenie. W miarę rozwoju technologii i unowocześniania przyrządów pomiarowych prognozowanie warunków atmosferycznych staje się coraz to bardziej precyzyjne. Wyliczenia modeli numerycznych są cennym źródłem informacji dla osób chcących wyznaczyć **prognozę krótko i średnioterminową**. Zdjęcia satelitarne, skany radarowe, dane z detektorów wyładowań atmosferycznych są niezbędne do **przewidywania ultrakrótkoterminowego (nowcasting)**. Nowcasting obejmuje prognozowanie pogody do 6 godzin naprzód i opiera się w głównej mierze na aktualnych danych pomiarowych.

Precyzyjne prognozowanie wymaga przede wszystkim obycia z wyżej wymienionymi produktami do przewidywania wartości różnych elementów meteorologicznych. Oprócz olbrzymiej mocy obliczeniowej komputerów bardzo ważna jest rola obserwatora, który wszystkie dostępne omówione w poradniku dane interpretuje i znajduje między nimi powiązania. W pracy szczególną uwagę poświęcono konwekcji, która stanowi podstawę do zrozumienia mechanizmu powstawania wszelkich gwałtownych zjawisk atmosferycznych. **Pod pojęciem zjawiska konwekcyjnego nie tylko rozumie się burze, ale także samą rozbudowę chmur o budowie pionowej.** Chmury *Cumulonimbus* nie muszą wcale przynosić wyładowań atmosferycznych, a powodować „jedynie” silny opad deszczu, nagły wzrost prędkości wiatru czy opady krupy śnieżnej. Konwekcja jest, więc bardzo szerokim pojęciem. Generalnie jest ona skutkiem wystąpienia chwiejności, czyli niestabilności w troposferze.

Mam nadzieję, że powyższy poradnik zachęcił czytelników do wykorzystania wszelkich źródeł prognoz pogody, jakimi są wyliczenia modeli numerycznych, mapy synoptyczne, obrazy radarowe, dane z sondaży aerologicznych czy detektorów wyładowań atmosferycznych. Do prawidłowego odczytywania owych „produktów” potrzebna jest wiedza na temat podstawowych elementów me-

teorologicznych i powiązań między nimi. Znajomość części 1, teoretycznej jest niezbędna do nauczania się praktycznego prognozowania pogody omówionego w części 2.

Po połączeniu powstał „Poradnik do odczytywania wyników prognoz pogody”.



Ryc. 78. Fot. Dawid Stępczyński

NEVER STOP CHASING AND FORECASTING!

Literatura:

1. Woś A., *Meteorologia dla geografów*, Wyd. PWN, Warszawa 2002, s. 13.
2. Kożuchowski K., *Meteorologia i klimatologia*, Wyd. PWN, Warszawa 2012, s. 232.
3. Kożuchowski K., *Meteorologia i klimatologia*, Wyd. PWN, Warszawa 2012, s. 85.
4. Kożuchowski K., *Klimat Polski Nowe spojrzenie*, Wyd. PWN, Warszawa 2011, s. 183.
5. Ostrowski K., Surowiecki A., Trębicki K., *Przewodnik do prognozowania burz z użyciem map wskaźników konwekcyjnych*, 2010, s.4.
6. Kożuchowski K., *Meteorologia i klimatologia*, Wyd. PWN, Warszawa 2012, s.165.
7. Woś A., *Meteorologia dla geografów*, Wyd. PWN, Warszawa 2002, s.174.
8. <https://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are> [dostęp: 12.05.2020]
9. <https://lowcyburz.pl/detektory/> [dostęp 25.09.2020]

Grafika:

Dawid Stępczyński: Ryc. 10, 14, 26, 27, 50, 78

Patryk Matczak: Ryc. 21, 56

<https://lowcyburz.pl/superkomorka/superkomorka-cechy/> : Ryc. 23

<https://klimatziemi.pl/obecnosci-i-przyszlosc-pary-wodnej-w-obszarach-najbardziej-wilgotnych-i-najbardziej-suchych-na-ziemi/> na podstawie <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dewpoint.jpg> :Ryc. 11

<https://www.wxcharts.com/> : Ryc. 1, 5, 6, 7, 15, 16, 20, 22, 39, 40, 47, 52, 53, 62, 63, 64, 68, 70

<http://www.modellzentrale.de/WRF4km/#0> : Ryc. 30, 77

<http://m.meteo.pl/kolobrzeg/60> : Ryc. 75

<https://radar-opadow.pl/> : Ryc. 34

Air Force Weather Agency : Ryc. 37

<https://czypada.pl/> : Ryc. 41, 46

http://pl.blitzortung.org/live_lightning_maps.php?map=15 : Ryc. 61

<http://mapy.meteo.pl/> : Ryc. 9, 31, 44, 45, 65, 66, 70-74,

<https://meteomodel.pl/gfs-para/T2M/00> : Ryc. 54, 55

<https://www.eswd.eu/> : Ryc. 51

<http://retsuz.pl/soundings/index.php> : Ryc. 60, 67

https://www.dwd.de/DE/leistungen/hobbymet_wk_europa/hobbyeuropakarten.html : Ryc. 29, 69

<https://www.weather.gov/jetstream/common> : Ryc. 2

<https://meteomodel.pl/gfs-para/T500/00> : Ryc. 3

http://www.cumulus.nazwa.pl/teoria/wiedza/w_rownowaga.htm : Ryc. 4

<https://meteoproгноza.pl/> na podstawie danych IMGW-PIB : Ryc. 8

<https://www.pivotalweather.com/model.php> : Ryc. 12

<https://meteomodel.pl/gfs-para/D2M/00> : Ryc. 13

<https://meteomodel.pl/gfs-para/CL/00>: Ryc. 17

<https://www.wetterzentrale.de/de/topkarten.php?model=gfs&time=3&lid=OP> : Ryc. 18, Ryc. 19

<http://www.lightningwizard.com/maps/>: Ryc. 24

<https://www.reddit.com/> : ryc. 25

Kozuchowski K., *Meteorologia i klimatologia*, Wyd. PWN, Warszawa 2012 str.165.: Ryc. 28

<https://polska-org.pl/8375846,foto.html>: Ryc. 32

Opracowanie własne: Ryc. 33

<http://daneradarowe.pl/>: Ryc. 35

<https://radar-opadow.pl/?date=202006071349&radartype=zhail>: Ryc. 36

https://www.blitzortung.org/en/live_lightning_maps.php?map=15 : Ryc. 38, 43

<https://meteomodel.pl/> na podstawie danych IMGW-PIB: Ryc.42

<https://meteomodel.pl/gfs-para/DLS/00> : Ryc. 48

<https://meteomodel.pl/gfs-para/SRH3/00>: Ryc. 49

<https://gorzowianin.com/> : Ryc. 57, 58, 59

<https://m.meteo.pl/poznan/60>: Ryc.76