

## Mrozy w Europie i w Polsce w pierwszej dekadzie stycznia 2024 roku

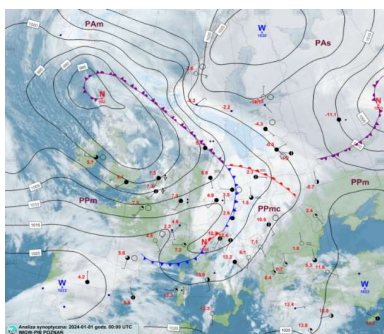
### Opracowanie przygotowali:

Kierownik zespołu: dr Grzegorz Duniec (CMM – Zakład Prognoz Numerycznych COSMO)  
dr Natalia Pilgaj (CMM – Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych)<sup>1</sup>  
mgr Karolina Kierklo (CBPM - Wydział w Białymstoku)<sup>2</sup>  
mgr Mateusz Zamajtys (CBPM - Wydział w Białymstoku)  
mgr inż. Piotr Szuster (CMM - Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych)

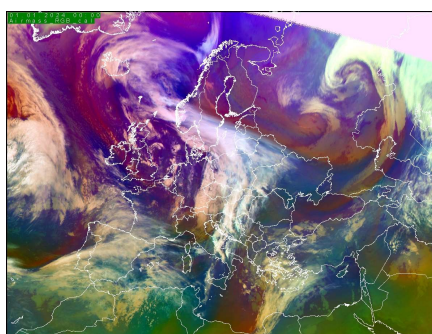
### **Mrozy nad Europą 1-10.01.2024 – analiza synoptyczna**

Silne mrozy nad Europą, w tym nad Polską, z pierwszej dekady stycznia 2024 r. związane były przede wszystkim z rozległym wyżem. Rozwijał się on dzień po dniu na północy Europy i „pompował” coraz bardziej wychłodzone powietrze z rejonu Arktyki i wyziębionego lądu Eurazji. W analizie skupimy się na mapach synoptycznych i zdjęciach satelitarnych z godziny 00 UTC (z małymi wyjątkami, czasem z powodu braku danych, jednak nadal będą to godziny nocne) ze względu na to, że najniższe wartości temperatury pojawiały się nocami oraz nad ranem. Do analizy również zostaną wykorzystane progностyczne mapy analizowanych pól meteorologicznych, które otrzymano z symulacji numerycznych modelem IFS (ECMWF). Pomiarzy temperatury zostały zaprezentowane z godziny 6:00 UTC, gdyż jest to w meteorologii jeden z głównych pomiarów, chociaż czasem pojawiały się wahania, nie większe niż 1°C, tuż po tym pomiarze.

Na początku roku **1.01.2024** Europa była pomiędzy rozległym wyżem z centrum nad Finlandią (ciśnienie 1030 hPa), a niżem, którego główny ośrodek był w rejonie północnego Atlantyku, zaś wtórne ośrodki tworzyły się w wydłużonej zatoce na falujących frontach atmosferycznych. Zatoka ta swoim zasięgiem docierała do Polski i dalej aż do krajów śródziemnomorskich i czarnomorskich (rys. 1 i 2).



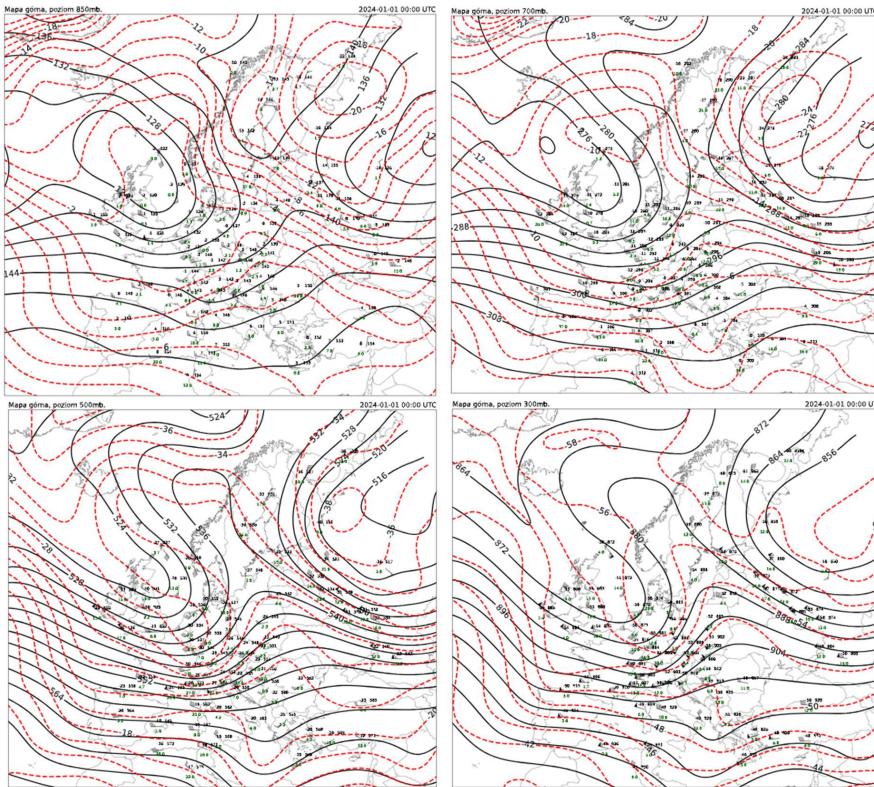
Rys. 1. Mapa synoptyczna Europy z dn. 01.01.2024 z godz 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)



Rys. 2. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 01.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)

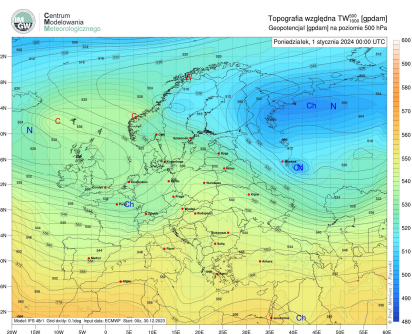
<sup>1</sup> CMM – Centrum Modelowania Meteorologicznego, IMGW-PIB

<sup>2</sup> CBPM – Centralne Biuro Prognoz Meteorologicznych, IMGW-PIB



Rys. 3. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 01.01. 2024 roku, godz. 00 UTC.

Nad Polską izotermi wygięte były na kształt klina. Na poziomie 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa zaznaczone było centrum chłodu o wartości  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-24^{\circ}\text{C}$ ,  $-38^{\circ}\text{C}$ .

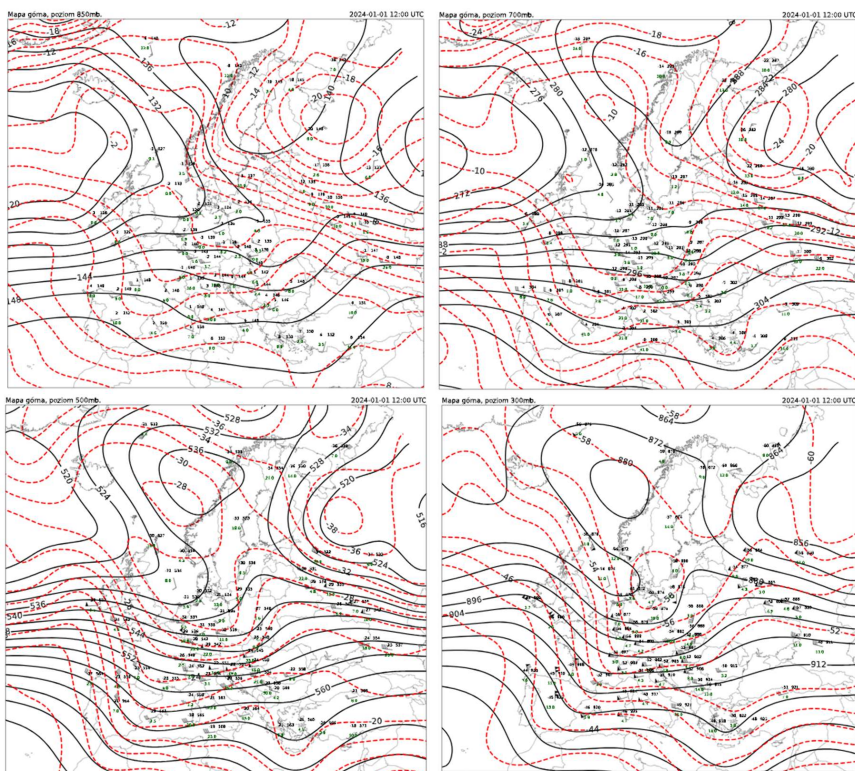


Rys. 4. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 01.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

W prognozie numerycznej ECMWF topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$  dobrze zaznaczona oś klina ciepła zalegająca nad Polską. Nad zachodnią i północno zachodnią Rosją zaznaczone dwa ośrodki chłodu pokrywające się o środkiem barycznym. Ośrodek cyklonalna nad Atlantykiem na poziomie TB500 znajduje się w pobliżu ośrodka

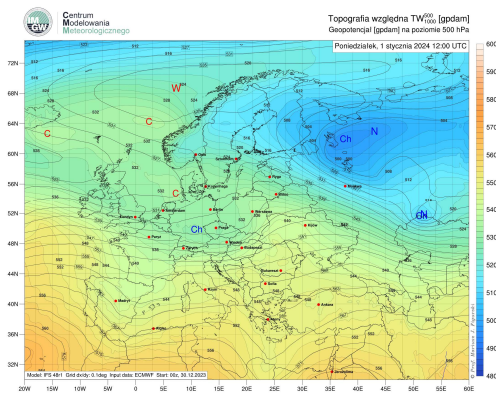
ciepła. Co wskazuje, że ośrodek niżowy jest asymetryczny termicznie. Klin ciepła pokrywa się z wycinkiem ciepłym niżu.

Na mapie TB850 oraz TB700 zaznaczona zamknięta cyrkulacja cykloniczna. Podobnie nad zachodnią Rosją również zaznaczona zamknięta cyrkulacja cykloniczna. Ze względu na granicę domeny brak możliwości wskazania cy na poziomie TB500 występuje zamknięta zamknięta izohipsa.



Rys. 5. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 01.01. 2024 roku, godz. 12 UTC.

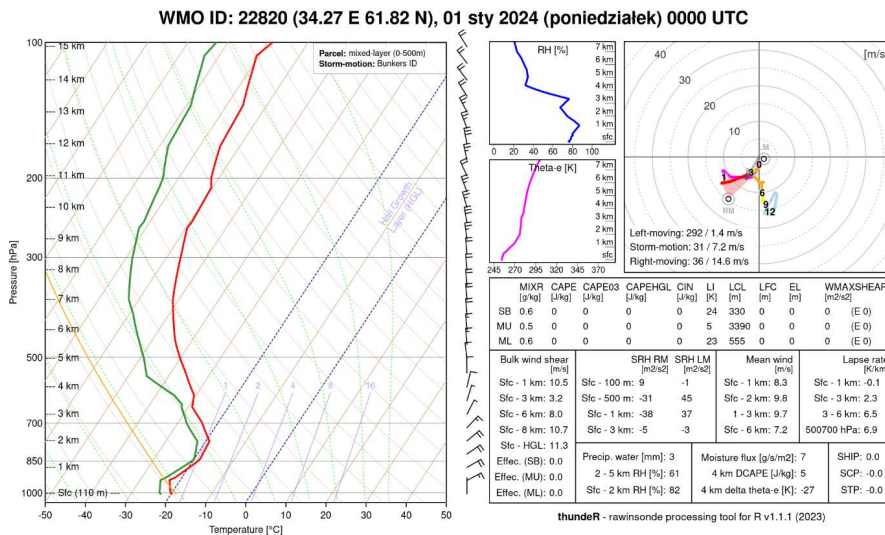
Na mapach topografii barycznej bezwzględnej TB widoczny wyż zalegający nad Finlandią, który był wysokim układem barycznym z osią pochyloną w kierunku zachodnim w stronę cieplejszej masy powietrza. Z analizy map TB wynika, że nad Polską występowała adwekcja chłodu. Na poziomie 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa oraz 300 hPa zaznaczone było centrum chłodu o wartości  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-24^{\circ}\text{C}$ ,  $-38^{\circ}\text{C}$  oraz  $-58^{\circ}\text{C}$ . Na poziomie 850 hPa, 700 hPa oraz 500 hPa zamknięta izoterma zalegała nad północno zachodnią Rosją. Na poziomie 300 hPa zamknięta izoterma zalegała nad południową Szwecją, Bałtykiem, Danią i Bałtykiem. Na poziomie 500 hPa izotermy na wschód od Polski gięły na kształt klina, oś klina ciepła zalegała na wschód od Polski, a południowa i wschodnia część kraju na skraju klina ciepła. Na zachód i południowy zachód izotermy gięły na kształt zatoki i oś zatoki zalegała na zachód Polski, docierając do południowo zachodnich krańców kraju. Sytuacja dobrze została odwzorowana w prognozie numerycznej ECMWF topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ .



Rys. 6. Prognostyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{500}^{1000}$ , 01.01.2024 roku, godz. 12 UTC.

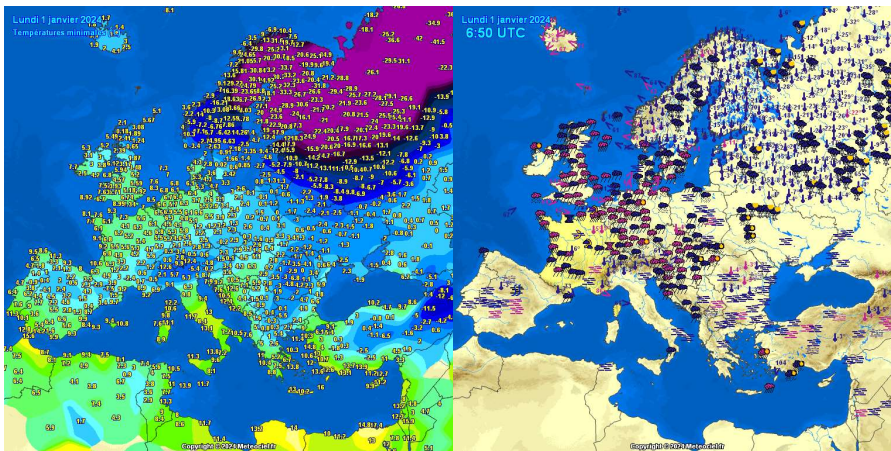
Również prawidłowo w prognozie odwzorowano położenie centrum chłodu, które pokrywało się z zamkniętymi izotermami na mapach TB. Według prognozy numerycznej południowo wschodnia i wschodnia Polska znajdowała się na skraju klina ciepła.

W zasięgu oddziaływania wyżu na północy Europy zalegało silnie wychłodzone powietrze pochodzenia arktycznego. Temperatura minimalna w pasie od północno-zachodniej części Rosji, przez Finlandię, po północną Szwecję i Norwegię wynosiła przeważnie do wartości od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $-20^{\circ}\text{C}$ . Masa powietrza charakteryzowała się znacznym i dość jednorodnym wychłodzeniem w dolnej części profilu pionowego. Nocne sondowanie z Pietrozawodska (rejon jez. Onega - Rosja) (22820) z godz. 00 UTC wskazywało na temperaturę  $-22^{\circ}\text{C}$  na poziomie 950 hPa (ok. 500 m n.p.g.) i około  $-19^{\circ}\text{C}$  na 850 hPa (ok. 1300 m n.p.g.). Jednocześnie zauważa się sporą zawartość wilgoci w powietrzu, które skutkowało występowaniem w wielu miejscach zachmurzenia, a także słabych opadów śniegu (rys. 7 i 8).



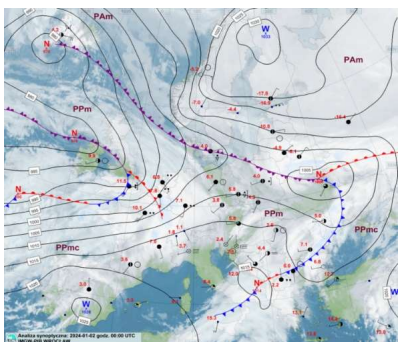
Rys. 7. Sondaż aerologiczny z Pietrozawodsk (22820) z 01.01.2024 godz. 00:00 UTC ([http://rawinsonde.com/thunder\\_app/](http://rawinsonde.com/thunder_app/))

Tego dnia ujemne wartości temperatury w Polsce pojawiły się jeszcze tylko na północnym wschodzie i miejscami na południu kraju, jednak nie były to silne mrozy, bo najniższa temperatura wyniosła  $-2,1^{\circ}\text{C}$  na posterunku w Białowieży (podlaskie). Na południu Polski przejściowo napływno też cieplejsze powietrze polarne (rys. 8).

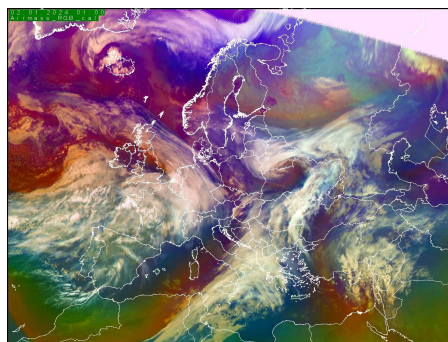


Rys. 8. Temperatura minimalna (po lewej) i dane obserwacyjne (po prawej) w Europie 01.01.2024 o godz. 06:00 UTC (<https://www.meteociel.fr>)

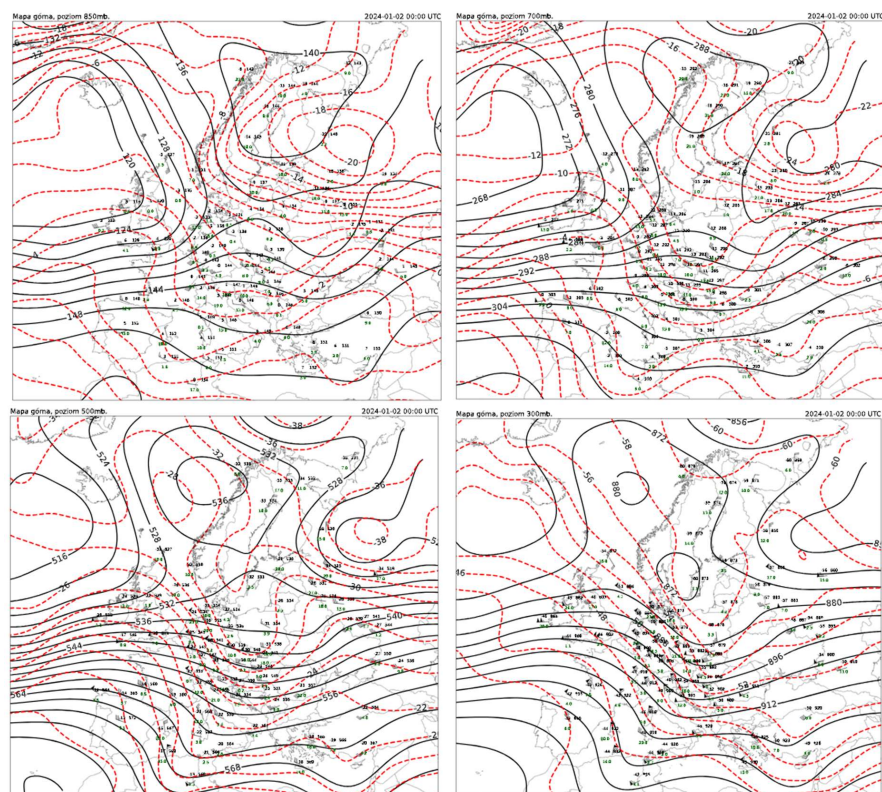
2.01.2024 wyżej wschodnio- i północnoeuropejski nieznacznie się umocnił (1033 hPa). Polskę rozdzielał jeszcze pofalowany front na chłodniejszą północno-wschodnią oraz nieco cieplejszą południowo-zachodnią (rys. 9 i 10).



Rys. 9. Mapa synoptyczna Europy z dn. 02.01.2024 z godz 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)

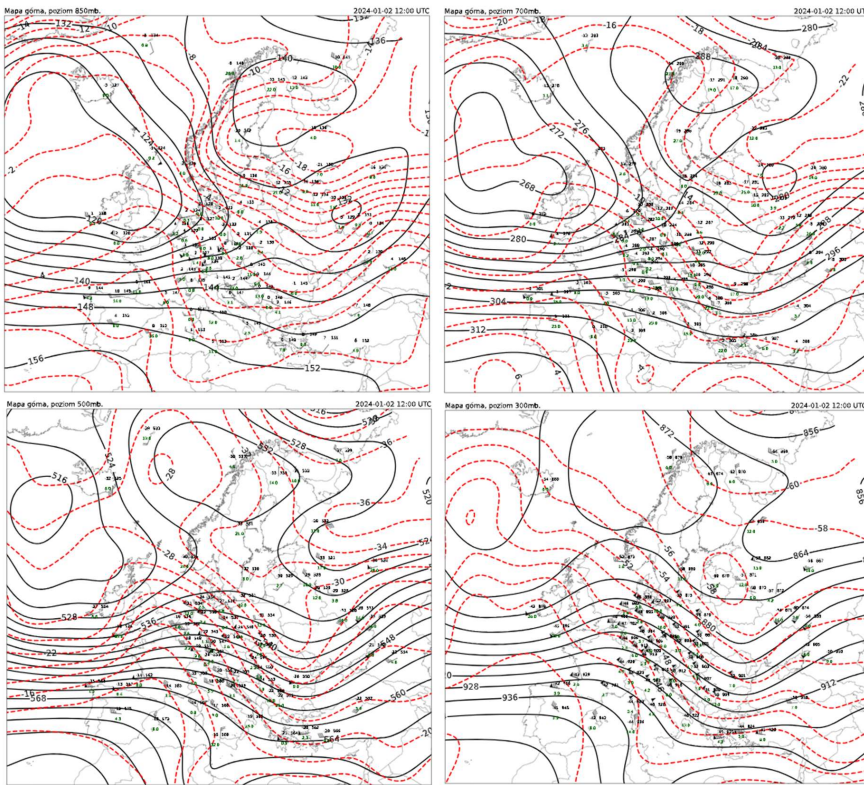


Rys. 10. Obraz satelitalny – produkt Airmass – z dn. 02.01.2024 z godz. 01 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)



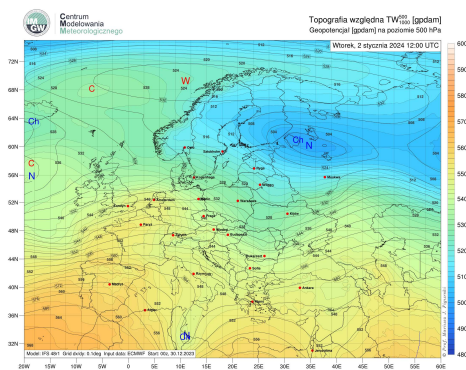
Rys. 11. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 02.01. 2024 roku, godz. 00 UTC.

W dalszym ciągu na wyższych poziomach zaznaczona była cyrkulacja antycyklonalna. Oś układu barycznego na niższych poziomach nieco się wyprostowała. Nad Polską izotermi wygięte zatokowo.



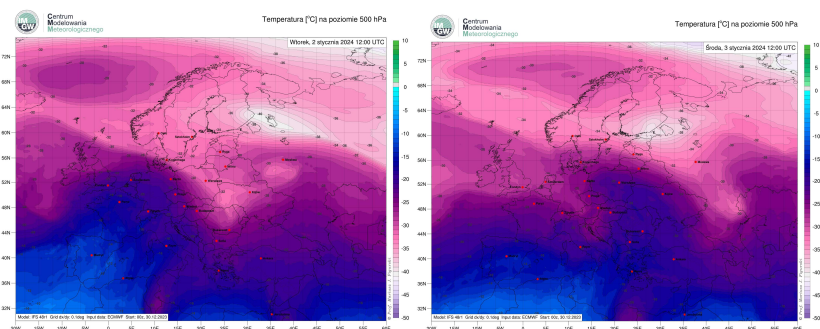
Rys. 12. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 02.01. 2024 roku, godz. 12 UTC.

Dwanaście godzin później nad Polską występował już ujemny kąt adwekcji wskazujący na adwekcję ciepła. Na mapie TB500 na zachodzie Europy izotermy wygięte na kształt klina co sugerowało, że Polska była na skraju klina ciepła.



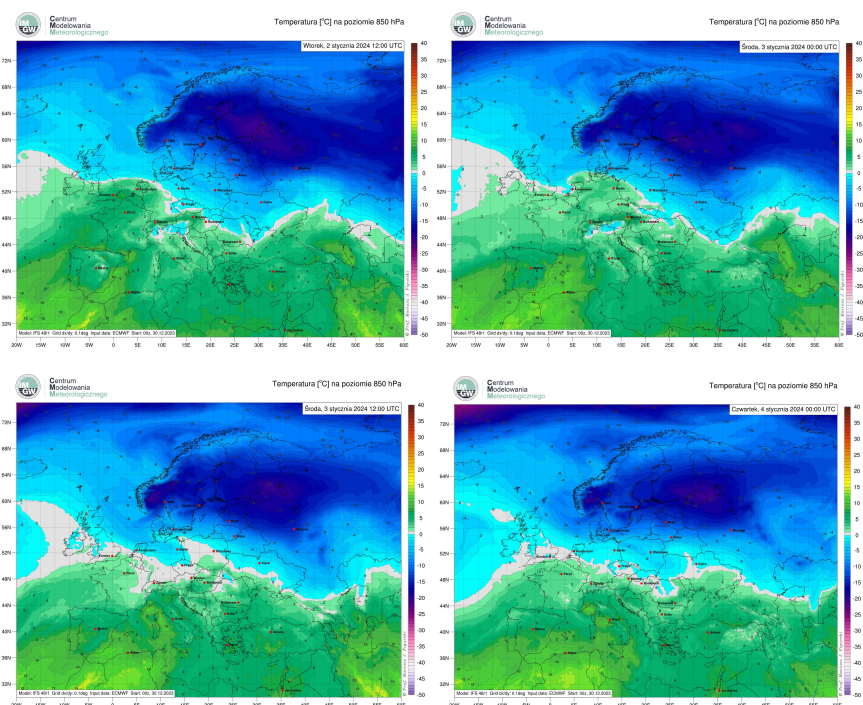
Rys. 13. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 02.01.2024 roku, godz. 12 UTC.

Prognozy numeryczne izohips względnych  $TW_{1000}^{500}$  również dość dobrze odwzorowały sytuację termiczną. Z prognoz wynikało, że Polska powinna znaleźć się na wschodnim skraju klina ciepła. Na mapie TB850 zaznaczone centrum chłodu nad północno zachodnią Rosją, które pokrywało się w tym rejonie z zamkniętymi izohipsami względnymi na prognostycznej mapie  $TW_{1000}^{500}$ . Wskazana adwekcja ciepła dobrze widoczna na mapach prognostycznych temperatury na mapie TB500.



Rys. 14. Prognostyczne mapy pola temperatury na poziomie 500 hPa, 02 i 03.01.2024 roku, godz. 12 UTC.

Na powyższych prognostycznych mapach, z krokiem 12 h, widać przemieszczający się z zachodu na wschód klina ciepła.

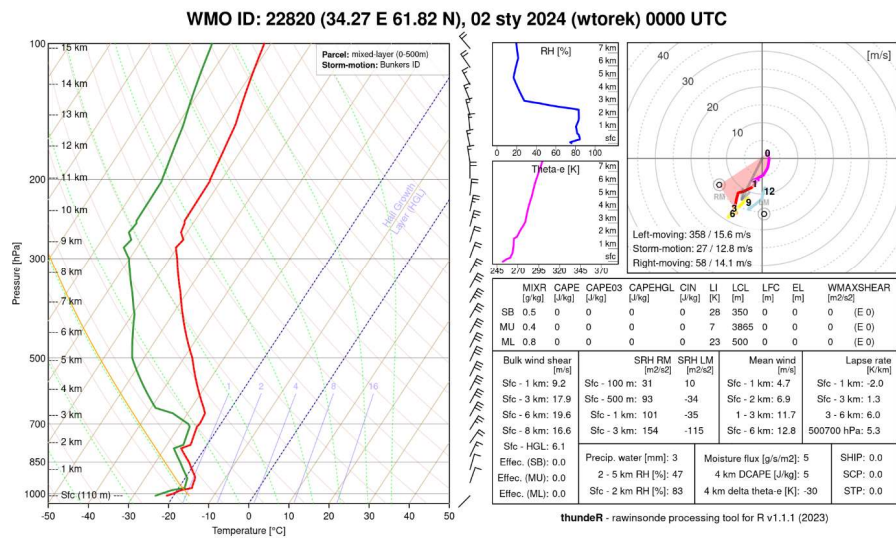


Rys. 15. Prognostyczne mapy pola temperatury na poziomie 850 hPa, od 02. 01.2024 roku, godz. 12 UTC do 04.01.2024 roku, godz. 00 UTC. Prognoza z krokiem co 12 godzin.

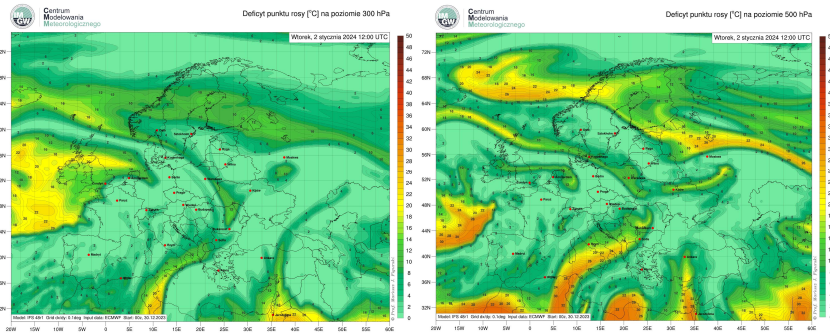


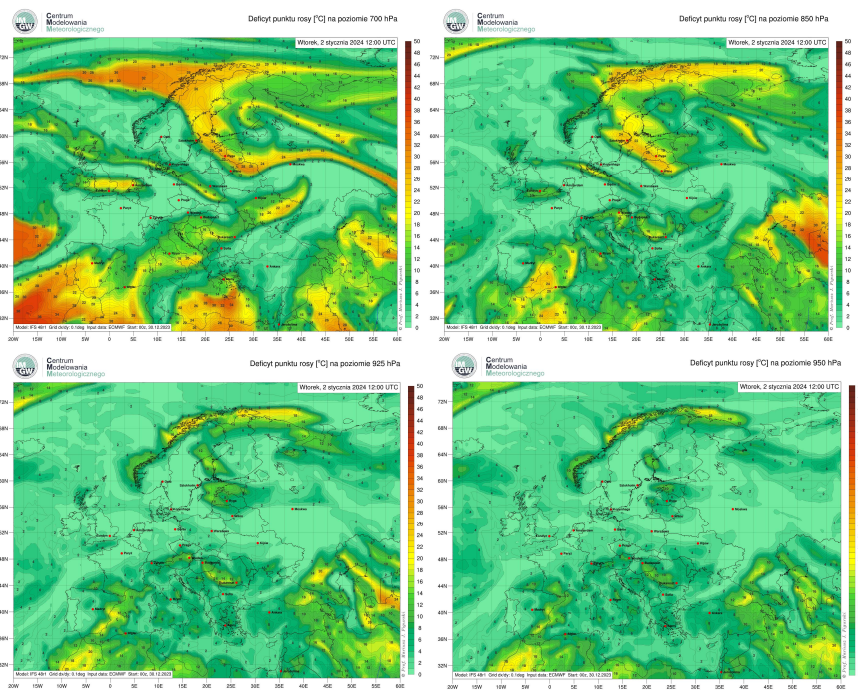
Z symulacji pola temperatury na wysokości 850 hPa widać, przemieszczający się klina ciepła, jednak temperatura powietrza na tej wysokości zmniejsza się w kolejnych krokach prognozy.

Zasięg występowania silnego mrozu na północy Europy przesunął się z kolei nieco w kierunku południowym, m.in. obejmując obszar Estonii oraz północną i centralną część Niziny Wschodnieuropejskiej. Sondaż aerologiczny z Pietrozawodsk nadal wskazywał na występowanie wilgotniejszych warstw powietrza w dolnej troposferze skutkujących pojawianiem się zachmurzenia (rys. 16).



Rys. 16. Sondaż aerologiczny z Pietrozawodsk (22820) z 01.01.2024 godz. 00:00 UTC ([http://rawinsonde.com/thunder\\_app/](http://rawinsonde.com/thunder_app/))



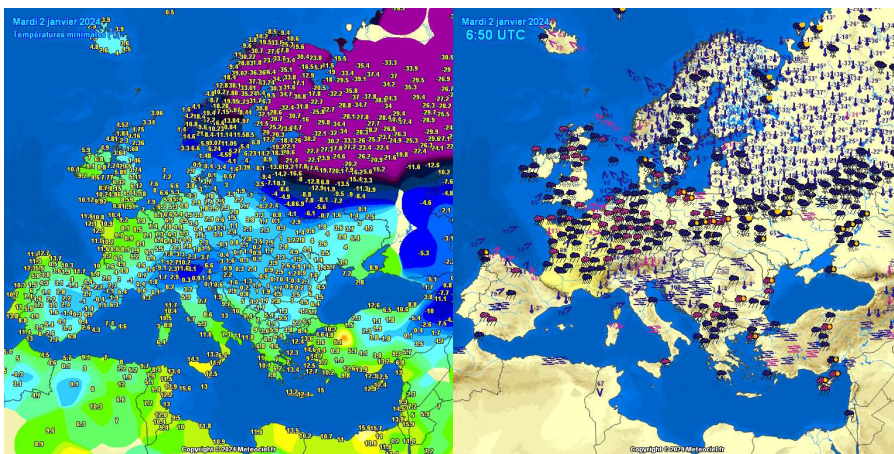


Rys. 17. Prognoza pola deficytu punktu rosy na poziomach 300 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, 925 hPa, 950 hPa, 02. 01.2024 roku, godz. 12 UTC.

Z analizy numerycznych symulacji na godzinę 12 UTC pola niedosytu punktu rosy również wynikało, że należało się spodziewać zachmurzenia w każdym piętrze chmurowym. Na poziomie 300 hPa jedynie w wąskim pasie na północnym wschodzie i wschodzie kraju należało oczekiwać dużego deficytu punktu rosy co wskazywało na brak zachmurzenia na poziomie 9 km. Mogły ewentualnie występować niewielkie ławice chmur Cirrus fibratus. Na wysokości 5,5 km (500 hPa) występowała rozległa strefa dużego deficytu w obszarze półnym, północno wschodnim i wschodnim Polski. Na pozostałym obszarze kraju deficyt był mały zatem należało się spodziewać się chmur pietra średniego. Na wysokości 700 hPa, 850 hPa prognozowana była niewielka strefa dużego deficytu punktu rosy rozciągającego się z północnego zachodu po centrum, a na wysokości 700 hPa rozciągała się w kierunku południowo wschodnim. Na niższych poziomach jedynie na południu oraz na zachodzie kraju miał występować duży deficyt punktu rosy co wskazywało na brak zachmurzenia chmurami Stratus i/lub Stratocumulus. Na pozostałym obszarze deficyt punktu rosy był niewielki i obserwowane były chmury Stratus, Stratocumulus. W wielu rejonach kraju na północy, północnym wschodzie i na wschodzie kraju występowały mgły i zamglenia.

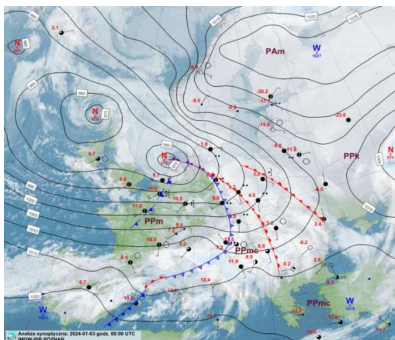
Najniższe wartości temperatury na przeważającym obszarze wyniosły  $-30^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$ , miejscami notowano też spadki do  $-39^{\circ}\text{C}/-36^{\circ}\text{C}$ . Miejscami notowane były także słabe opady śniegu. Lokalnie jednak, ze względu na coraz dłuższe oddziaływanie wyżu i prądów zstępujących z suchszym powietrzem, pojawiały się większe przejaśnienia i rozpozgodzenia prowadzące do silniejszych spadków temperatury (rys. 18).

W Polsce najniższe wartości temperatury nadal przeważnie występowały na północnym wschodzie oraz w rejonach podgórskich. Poza szczytami górskimi najniższa temperatura wystąpiła w Suwałkach  $-4,4^{\circ}\text{C}$  (podlaskie) (rys. 18).

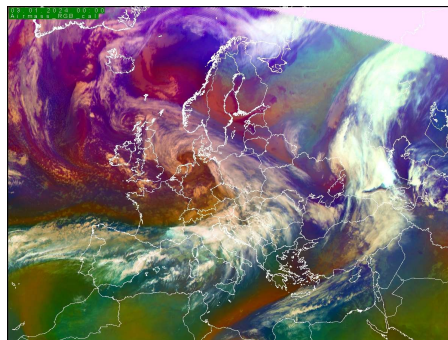


Rys. 18. Temperatura minimalna (po lewej) i dane obserwacyjne (po prawej) w Europie 02.01.2024 o godz. 06:00 UTC (<https://www.meteociel.fr>)

**3.01.2024** sytuacja nieco się zburzyła. Od zachodu napłynęło więcej wilgoci. Wyż z północy i wschodu nieco osłabił (1027 hPa), a nad Polską pojawiły się kolejne fronty atmosferyczne, które przyniosły także sporo opadów atmosferycznych. Nad Polską zwiększył się też gradient ciśnienia, co skutkowało nasileniem się wiatru (rys. 19 i 20).

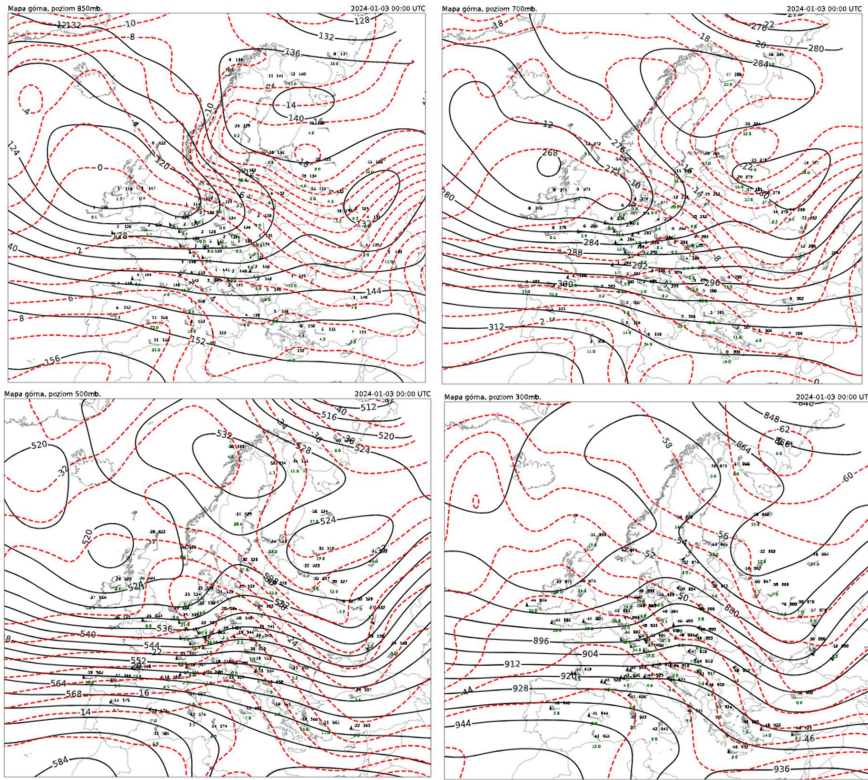


Rys. 19. Mapa synoptyczna Europy z dn. 03.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)

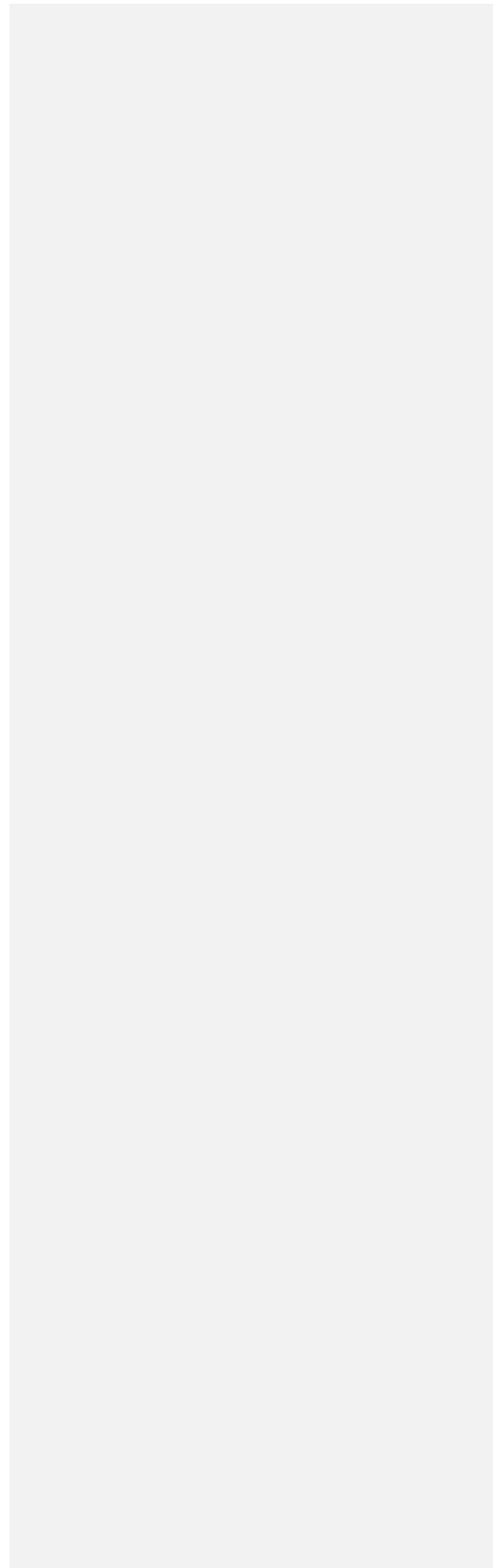
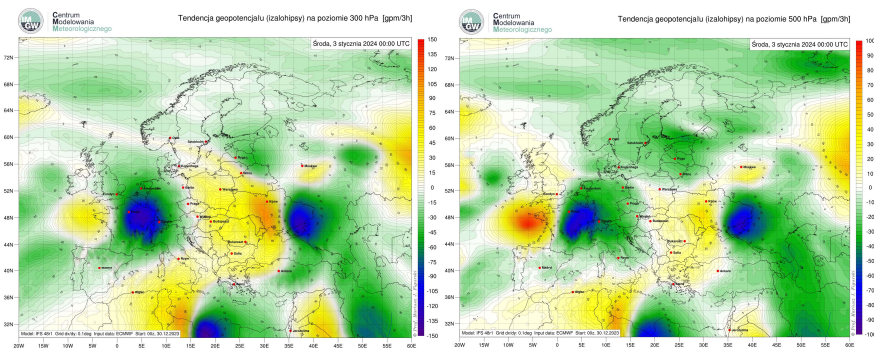


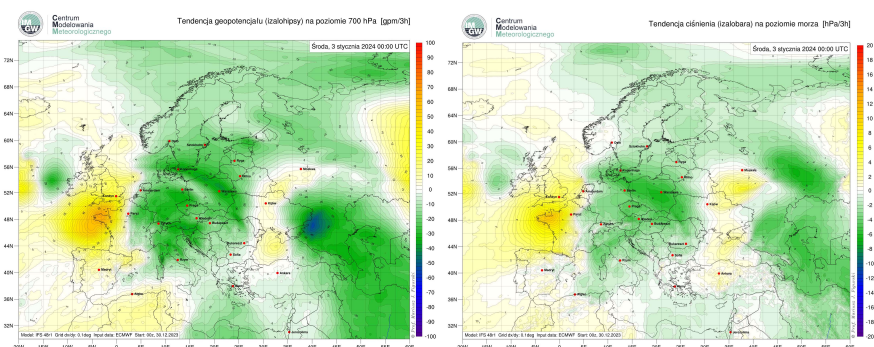
Rys. 20. Obraz satelitalny – produkt Airmass – z dn. 03.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)

Nad Europą północną i wschodnią sytuacja pozostawała bez istotnych zmian. Centrum wyżu przesunęło się jedynie nieco bardziej na wschód, z rejonu Skandynawii w okolice Morza Białego.



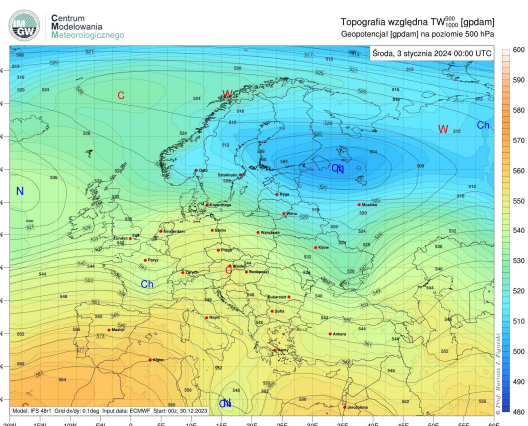
Rys. 21. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 03.01. 2024 roku, godz. 00 UTC.





Rys. 22. Progностyczne pole tendencji geopotencjału (TB300, TB500, TB700) oraz ciśnienia, 03.01. 2024 roku, godz. 00 UTC.

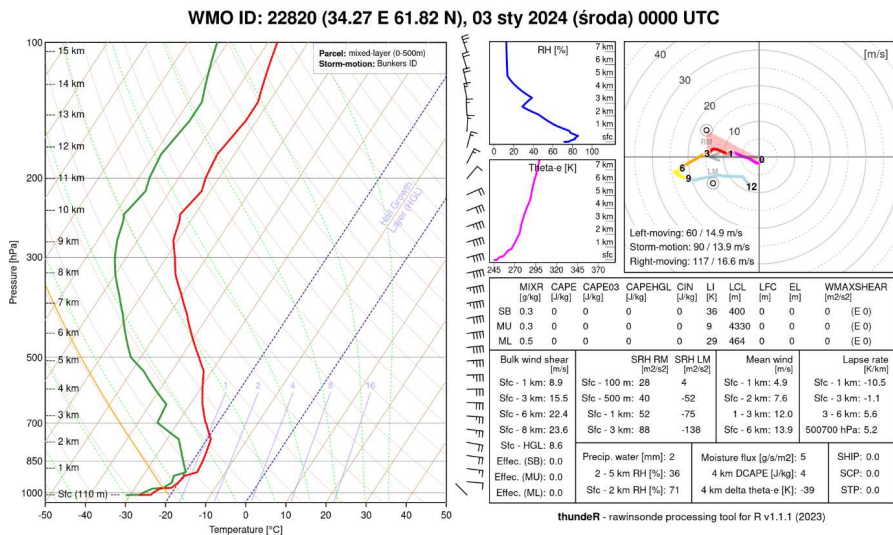
Jak już wspomniano wyżej weszł w fazę słabnięcia. Proces słabnięcia, jak wynika z numerycznych prognoz tendencji ciśnienia i geopotencjału, dotarł już do górnej troposfery. Do tej wysokości zaznaczona jest ujemna tendencja ciśnienia i geopotencjału. Na mapach TB300, TB500, TB700 dobrze zaznaczona cyrkulacja antycyklonalna. Na mapie TB850 nie widać już zamkniętej cyrkulacji antycyklonalnej. Nad Polską zaznaczył się ujemny kąt adwekcji, czyli występowała adwekcja ciepła.



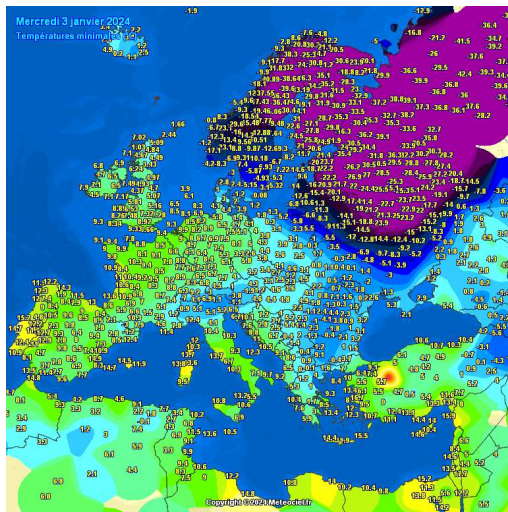
Rys. 23. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 03.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

Nad Polską przemieszczał się układ frontów atmosferycznych związanych z niżem znad Morza Północnego. Układ znajdował się w fazie okludowania. Na progностycznych mapach  $TW_{1000}^{500}$  widoczne nad Polską izohipsy względne gięte były na kształt klina. Strefa zagęszczonych izohips względnych przesunięta w kierunku chłodniejszej masy powietrza. Z pola progностycznych izohips względnych wynikało, że Polskę zachodnią powinna znajdować się na skraju klina ciepła, zaś północno wschodnie na skraju zatoki chłodu. Na ENE od Estonii ośrodek chłodu pokrywał się z centrum cyrkulacji cyklonicznej na wysokości 500 hPa.

Zasięg silnego mrozu o poranku także istotnie się nie zmienił. Na sondażu aerologicznym w analizowanym punkcie zauważa się jednak wyraźniejsze wysuszenie dolnej części troposfery, co powodowało zanik chmur warstwowych, a w rezultacie wystąpienie jeszcze silniejszego mrozu z wartościami temperatury rzędu  $-40^{\circ}\text{C}/-30^{\circ}\text{C}$  na większym obszarze zalegania badanej masy powietrza (rys. 24 i 25).

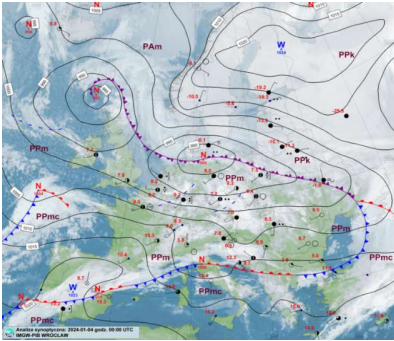


Rys. 24. Sondaż aerologiczny z Pietrozavodska (22820) z 03.01.2024 godz. 00:00 UTC ([http://rawinsonde.com/thunder\\_app/](http://rawinsonde.com/thunder_app/))

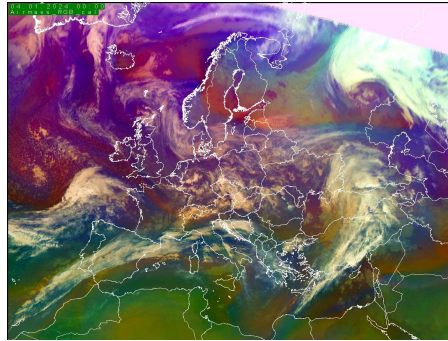


Rys. 25. Temperatura minimalna w Europie 03.01.2024 o godz. 06:00 UTC (<https://www.meteociel.fr/>)

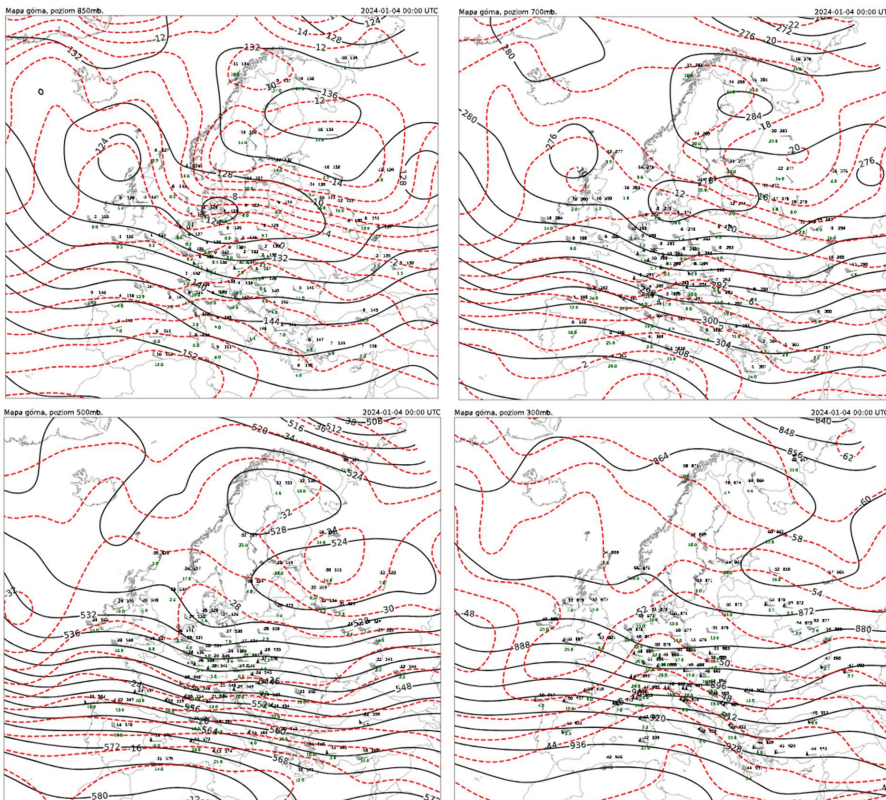
**4.01.2024** sytuacja była podobna do tej z dnia poprzedniego. Wyż ponownie osłabł (1024 hPa), a nad Polską zalegał front. Nadal też zalegało sporo wilgoci, jednak nad wschodnie części kraju zaczęło docierać już powoli powietrze kontynentalne, niesione przez wschodni wiatr (rys. 26 i 27).



Rys. 26. Mapa synoptyczna Europy z dn. 04.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)



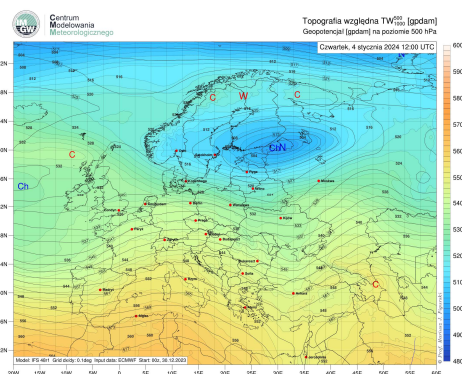
Rys. 27. Obraz satelitalny – produkt Airmass – z dn. 04.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)



Rys. 28. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 04.01. 2024 roku, godz. 00 UTC.

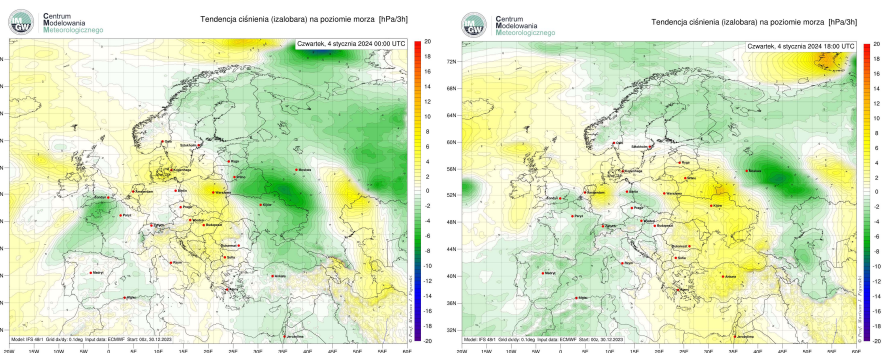
Nad Polską znajdowała się zatoka w której zalegał front okluzji. Zatoka była dość rozległa i rozciągała się od Atlantyku aż po Morze Czarne, gdzie znajdował się punkt zwrócenia frontów ciepłego i chłodnego. Ośrodek cyklonalny

zalegający nad Atlantykiem w pobliżu Wielkiej Brytanii był średnim układem barycznym rozbudowanym do poziomu 700 hPa. Ośrodek niżowy zaznaczony na froncie okluzji nad północnymi Niemcami również był średnim układem barycznym rozbudowane do poziomu 500 hPa. Słabnący Wyż znad Skandynawii również rozbudowany do poziomu 500 hPa. Powyżej 500 hPa brak samodzielnej cyrkulacji antycyklonalnej. Nad południową i zachodnią Europą zwiększony gradient ciśnienia oraz geopotencjału.



Rys. 29. Prognostyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 04.01.2024 roku, godz. 12 UTC.

Z prognostycznych mapach topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$  wynikało, że Polska południowo zachodnia i centralna była w zasięgu klina ciepła. Na północnym wschodzie zaznaczyła się zatoka chłodu. Nad Polską izohipsy biegły prawie równoległe do izoterm średniej temperatury warstwy (izohipsy względne TW) co oznacza nieznaczne adwekcyjne zmiany temperatury powietrza. Jedynie na południu kraju izohipsy względne odchylają się na prawo od izohips bezwzględnych co oznacza adwekcję ciepła. Na północnym wschodzie od Estonii zalegało centrum chłodu, które pokrywało się z osrodkiem cyklonicznym.



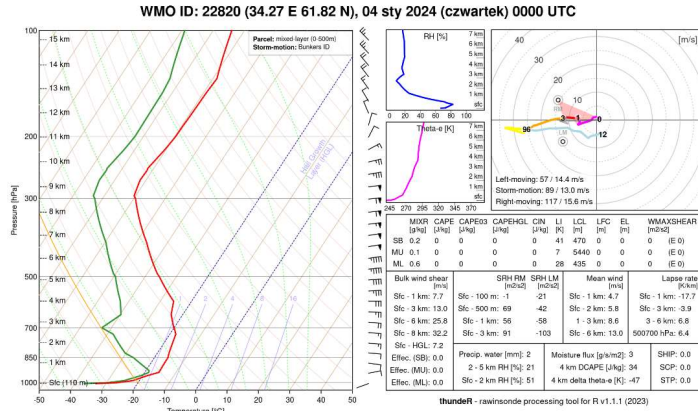
Rys. 30. Prognostyczne pole tendencji ciśnienia, 04.01. 2024 roku, godz. 00 UTC i 18 UTC.

Nad Polską zalegał osrodek izalobaryczny, z maksymalną tendencją ciśnienia w rejonie woj. mazowieckiego. Osrodek przemieszczał się na wschód. Od zachodu, w godzinach wieczornych nasunęła się w rejon południowo wschodniej Polski strefa ujemnej tendencji ciśnienia.

Kiedy nad Polską dochodziło do ścierania się dwóch różnych mas powietrza w strefie frontowej, w zalegającym na północy i wschodzie wyżu, powietrze nadal ulegało procesowi dalszego wychładzania i wysuszania. Sondowanie



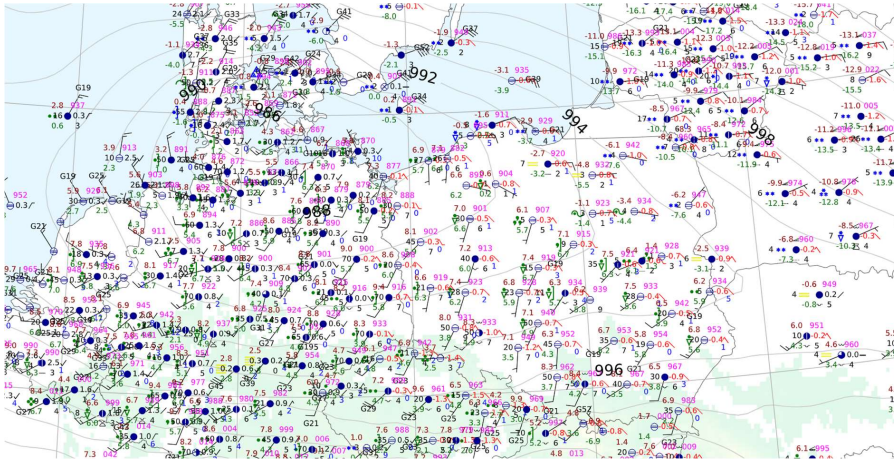
z Pietrozavodska wskazało bardzo silne wychłodzenie najniższych warstw troposfery – przy powierzchni ziemi temperatura wyniosła -33°C. Pionowy profil troposfery był też jeszcze suchszy, aniżeli dobę wstecz (rys. 31).



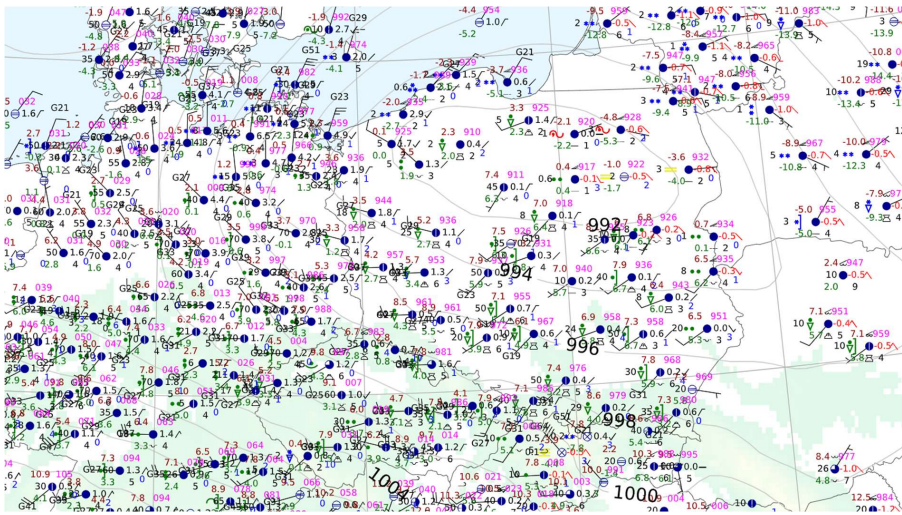
Rys. 31. Sondaż aerologiczny z Pietrozavodska (22820) z 04.01.2024 godz. 00:00 UTC ([http://rawinsonde.com/thunder\\_app/](http://rawinsonde.com/thunder_app/))

Silny mróz rzędu -20°C ponownie zszedł nieco bardziej na południe – tym razem w głąb Skandynawii, gdzie rozbudował się klin omawianego wyżu (rys. 32).

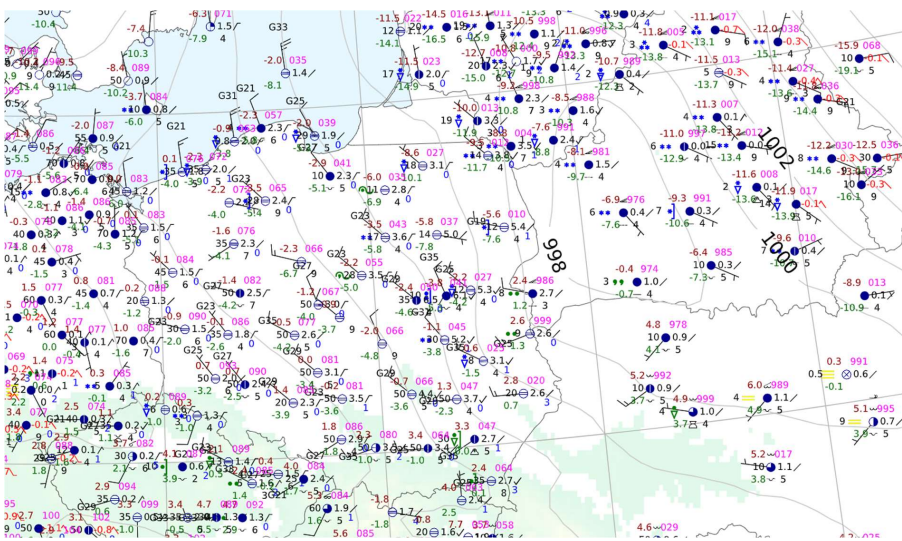
W Polsce po wschodniej stronie frontu rano pojawiły się wartości ujemne temperatury, przede wszystkim w woj. podlaskim, warmińsko-mazurskim oraz pomorskim. Najniższe wartości osiągnęły tam w wielu punktach około -9°C/-8°C. W ciągu dnia przez Polskę przemieścił się umiarkowanej głębokości niż, który się wypełniał i w drugiej połowie doby znajdował się nad wschodnimi krańcami kraju (rys. 32, 33, 34, 35).



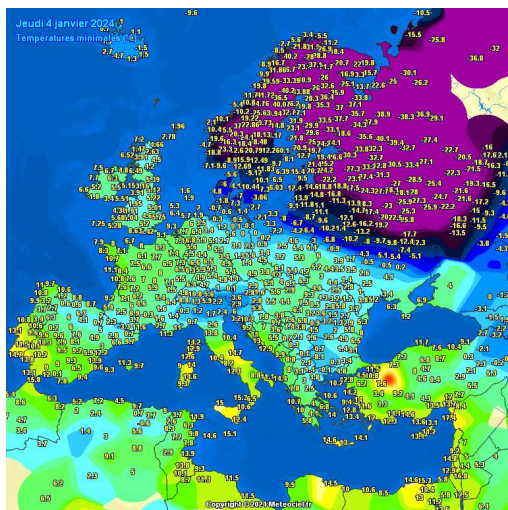
Rys. 32. Fragment mapy synoptycznej, 04.01.2024 roku, godz. 00 UTC.



Rys. 33. Fragment mapy synoptycznej, 04.01.2024 roku, godz. 12 UTC.

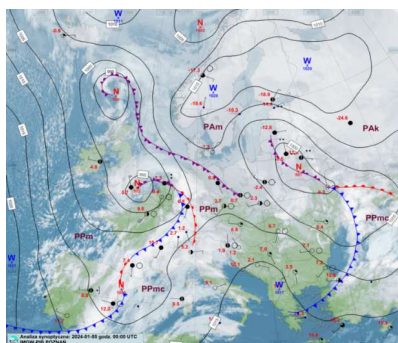


Rys. 34. Fragment mapy synoptycznej, 05.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

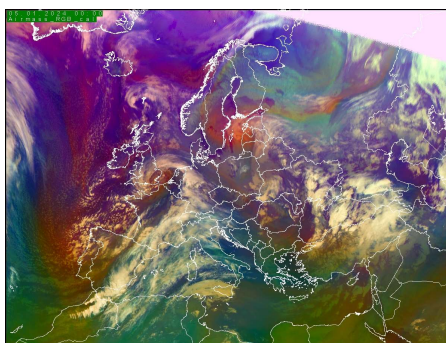


Rys. 35. Temperatura minimalna w Europie 04.01.2024 o godz. 06:00 UTC (<https://www.meteociel.fr>)

5.01.2024 niż, który przemieścił się przez Polskę znalazł się w rejonie Estonii. Struktura silnych i stabilnych układów barycznych została zaburzona. Blokada wyżowa na wschodzie ciągle słabła (1020 hPa), od zachodu nadciągał kolejny układ niżowy, a nad Polską gradient baryczny się rozmywał (rys. 36 i 37).

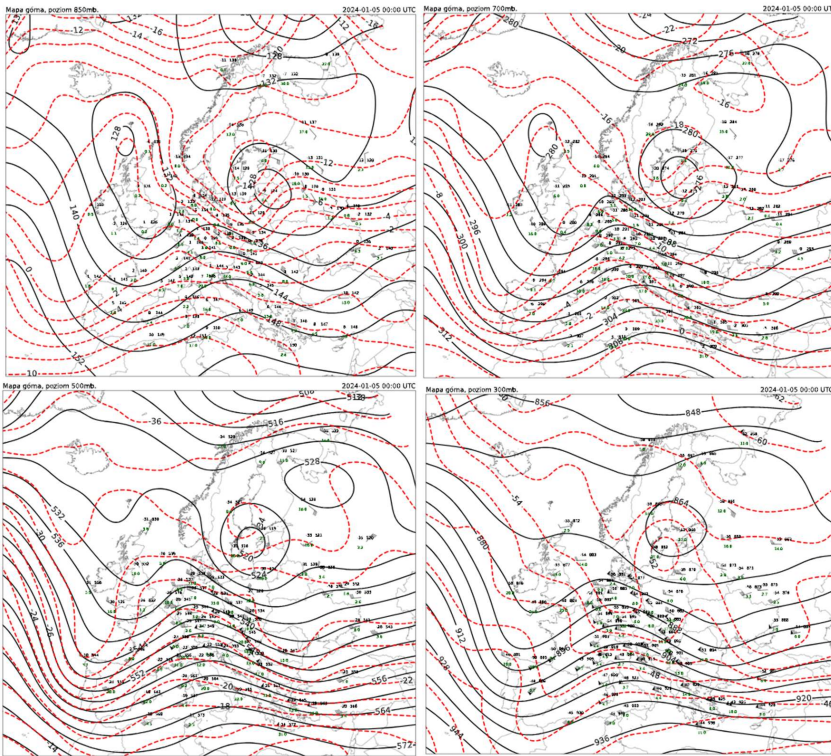


Rys. 36. Mapa synoptyczna Europy z dn. 05.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl>)



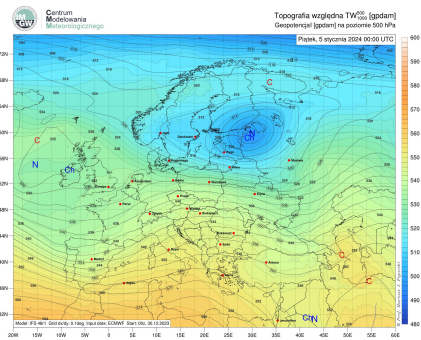
Rys. 37. Obraz satelitarny produkt Airmass – z dn. 05.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)

Pomimo ogólnego spadku ciśnienia w wyżu zasięg jego oddziaływania nieco się rozszerzył - nad Skandynawią utworzyło się kolejne centrum. Silny mroź przesunął się także na południe Skandynawii, a na wschodzie został ograniczony ze względu na pojawienie się układów niżowych w rejonie krajów bałtyckich (rys. 41).



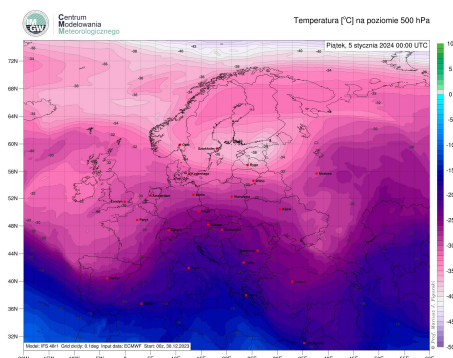
Rys. 38. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 05.01. 2024 roku, godz. 00 UTC.

Ośrodek niżowy zalegający nad Białorusią był układem wysokim, zamknięta cyrkulacja zaznaczona była aż do górnej troposfery. Ośrodek niżowy nad Atlantykiem był układem średnim. Zamknięta cyrkulacja cykloniczna zaznaczona była do poziomu 700 hPa. Wyżej izohipsy gięte były na kształt zatoki. Do Polski sphywało powietrze z północnego zachodu. Aż do górnej troposfery zaznaczony ośrodek chłodu zobrażowane zamkniętymi izotermami  $-14^{\circ}\text{C}$ ,  $-18^{\circ}\text{C}$ ,  $-34^{\circ}\text{C}$ ,  $-52^{\circ}\text{C}$  odpowiednie na poziomach TB850, TB700, TB500 oraz TB300. Obszar chłodu nie pokrywa się z ośrodkiem cyklonalnym, co wskazuje że ośrodek niżowy jest asymetryczny termicznie.



Rys. 39. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 05.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

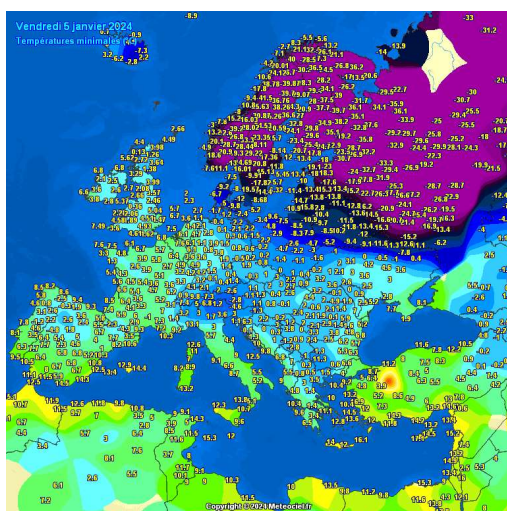
Zamknięte izohipsy względne (nad zachodnią Rosją przy granicy z Estonią) przesunięte nieznacznie względem zamkniętych izohips bezwzględnych co potwierdza asymetrię termiczną układu.



Rys. 40. Progностyczne mapy pola temperatury na poziomie 500 hPa, 05.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

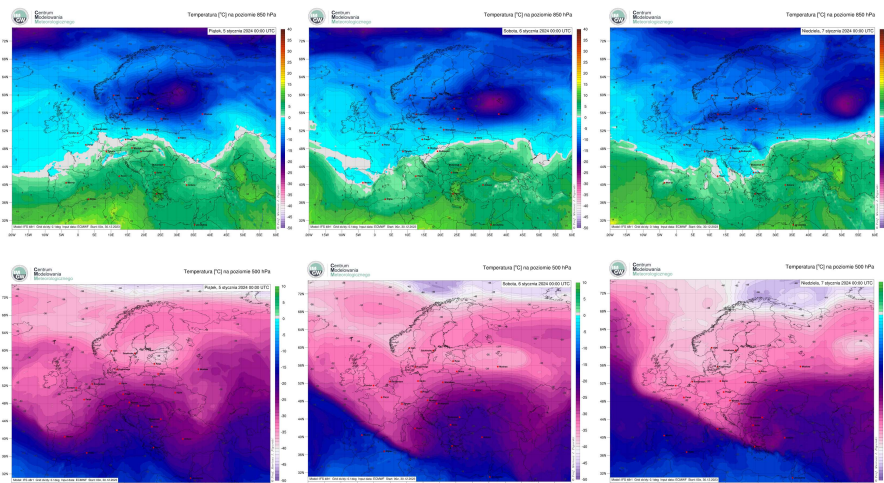
Nad południową Polską zalegała cieplejsza masa powietrza. W kierunku północnym średnia temperatura warstwy 500 hPa zmniejszała się. Podobny rozkład temperatury był prognozowany na wysokości 500 hPa. Północny rejon kraju znajdował się obszar chłodu.

O poranku niemal w całej Polsce (z wyjątkiem południa) wystąpiły ujemne wartości temperatury, najniższe do -10°C na północnym wschodzie. Z północy bowiem rozpoczął się wlew coraz zimniejszego i świeżego powietrza arktycznego (rys. 41).



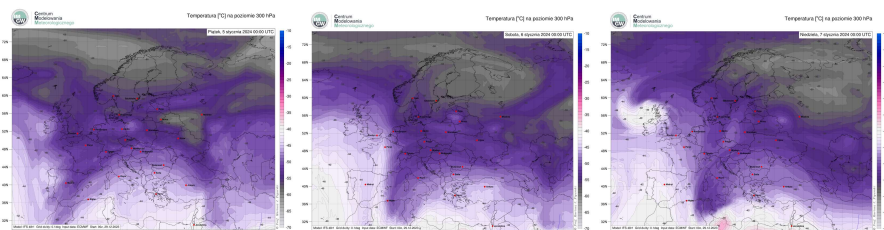
Rys. 41. Temperatura minimalna w Europie 05.01.2024 o godz. 06:00 UTC (<https://www.meteociel.fr>)

Adwekcja chłodnych mas powietrza był widoczny w prognozie numerycznej w kolejnych krokach prognozy na mapach TB850 oraz TB500.



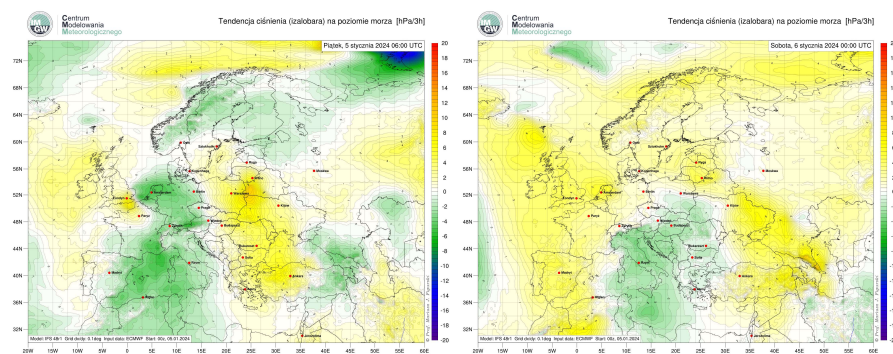
Rys. 42. Progностyczne mapy pola temperatury na poziomie 850 hPa i 500 hPa, 05-07.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

Natomiast na poziomie TB300 w prognozach numerycznych nie był zauważalny napływ chłodniejszej masy powietrza.



Rys. 43. Progностyczne mapy pola temperatury na poziomie 300 hPa, 05-07.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

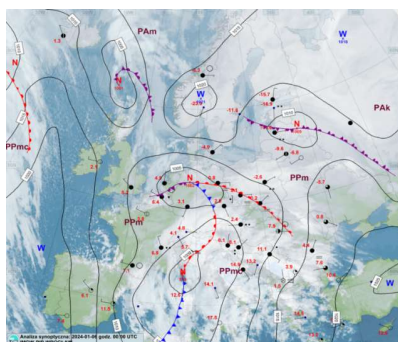
**6.01.2024** sytuacja była bardzo podobna, jak dzień wcześniej. Powietrze arktyczne nadal wlewało się powoli z północy, ale wyżej zaczął się ponownie umacniać (1021 hPa).



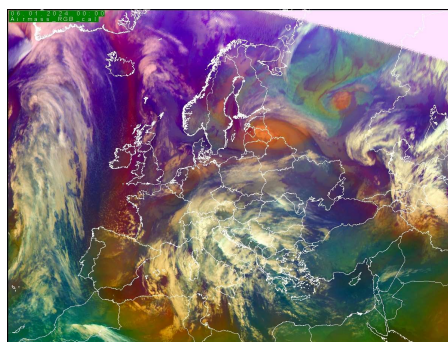
Rys. 44. Progностyczne pole tendencji ciśnienia, 05.01.2024 roku z godz. 06 UTC oraz 06.01.2024 roku z godz. 00 UTC.

Regenerację wyżu zauważyć można w prognostycznym polu izalobacyjnym. Jeszcze 5 stycznia 2024 roku o godzinie 06 UTC nad Skandynawią zalegało pole ujemnej tendencji ciśnienia. W ciągu 18 godzin pole izalobaryczne przebudowało się i już 6 stycznia 2024 roku nad znaczym obszarem Skandynawii zalegała dodatnia tendencja ciśnienia. Zatem należało oczekiwać, że w ciągu najbliższej doby dojdzie do regeneracji układu antycyklonalnego. Ponadto we wcześniejszych symulacjach numerycznych (start prognozy 30 grudnia 2023 roku) obserwowano wzrost gradientu temperatury oraz nasilenie się wiatru w górnej troposferze w obszarze wcześniej słabnącego antycyklonu.

W obszarze słabogradientowym nad krańce południowo-zachodnie wkroczył ciepły front atmosferyczny (rys. 45 i 46).

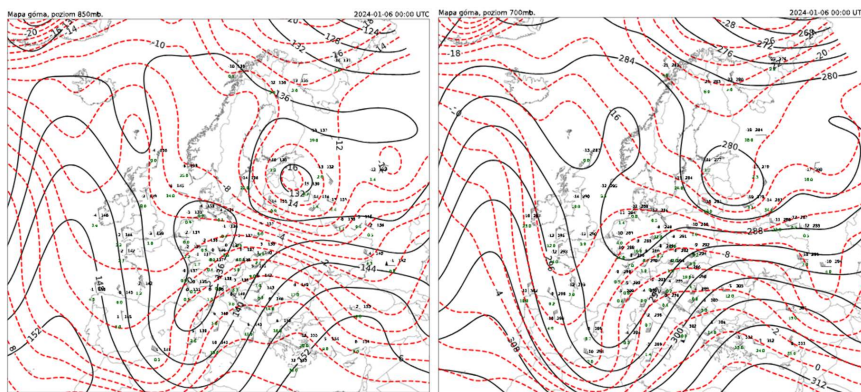


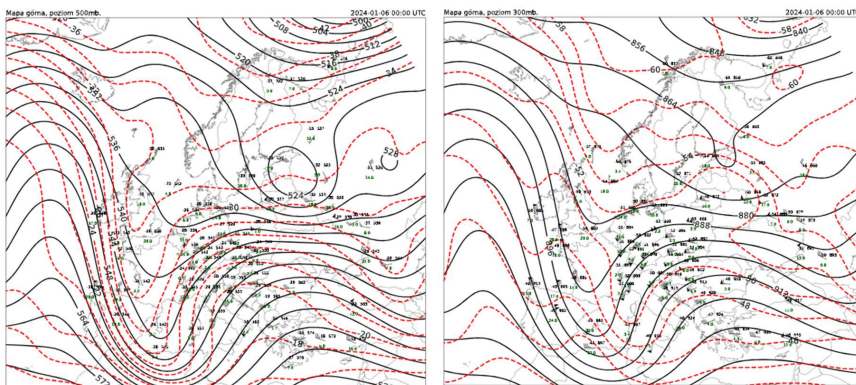
Rys. 45. Mapa synoptyczna Europy z dn. 06.01.2024 z godz 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)



Rys. 46. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 06.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)

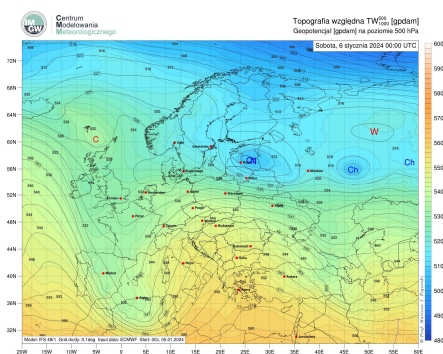
Zasięg silnego mrozu na północy i wschodzie Europy pozostawał bez zmian, podobnie jak charakterystyka mroźnego, silnie wychłodzonego powietrza (rys. 49 i 50).





Rys. 47. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 06.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

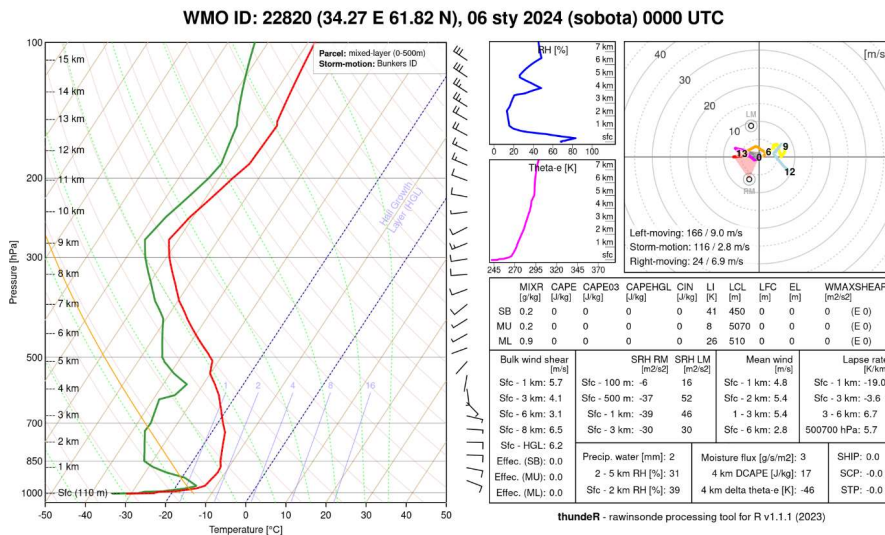
Przyziemny układ antycyklonalny zalegający nad Skandynawią nie jest widoczny na wyższych poziomach izobarycznych. Nad Europą zachodnią na poziomach TB700, TB500, TB300 dobrze wyrażona zatoka niskiego ciśnienia w której znajduje się powierzchnia frontowa. Na poziomie TB850 widoczna zamknięta cyrkulacja cykloniczna. Nad zachodnią Rosją przy granicy Łotwy i Estonii zalegający układ niskiego ciśnienia był układem średnim. Do poziomu 500 hPa zaznaczona zamknięta cyrkulacja cykloniczna. Wyżej dobrze wyrażona zatoka. Nad Polską występował ujemny kąt adwekcji co wskazuje na adwekcję chłodu.



Rys. 48. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 06.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

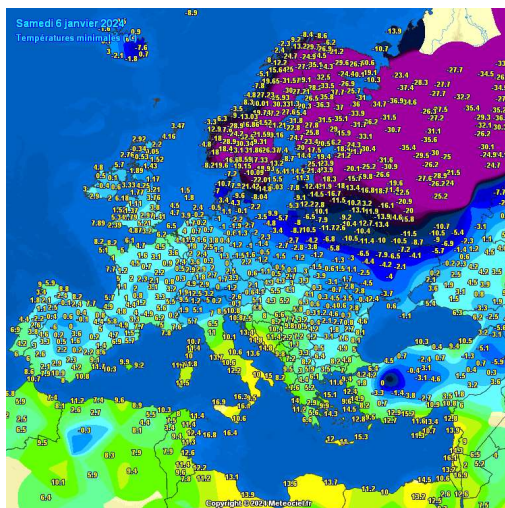
Polska południowa była na skraju klina ciepła, który pokrywa się z ciepłym wycinkiem niżu. Północno wschodnie obszary kraju w zasięgu zatoki chłodu. Centrum chłodu zalegało nad Łotwą. Nad Polską zagęszczone izohipsy względne przesunięte w stronę chłodniejszej masy powietrza, przed strefą frontu atmosferycznego ciepłego.





Rys. 49. Sondaż aerologiczny z Pietrozawodsk (22820) z 06.01.2024 godz. 00:00 UTC ([http://rawinsonde.com/thunder\\_app/](http://rawinsonde.com/thunder_app/)).

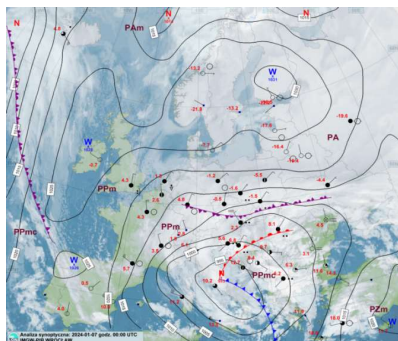
W Polsce na północy i wschodzie temperatura poranku była znowu nieco niższa o około 1°C i wyniosła punktowo -11°C, chociaż ujemne wartości wystąpiły wszędzie po wschodniej stronie frontu. Te najniższe powiązane były też z mniejszą ilością wilgoci, a co za tym idzie brakiem lub znikomą ilością chmur, które blokowałyby wypromieniowanie nocne (rys. 50).



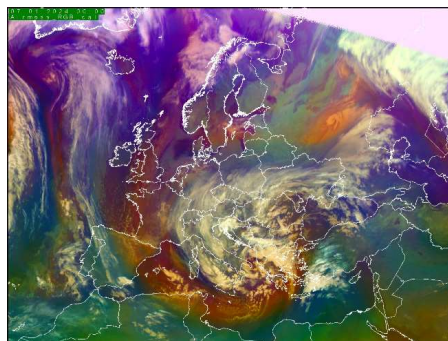
Rys. 50. Temperatura minimalna w Europie 06.01.2024 o godz. 06:00 UTC (<https://www.meteociel.fr/>).

7.01.2024 wyżej nadal się umacniał (ciśnienie w centrum 1031 hPa) i zaczął obejmować już całą północną Europę. Izobary ustawiły się praktycznie równoleżnikowo, co skutkowało napływem arktycznego powietrza ze wschodu i północnego wschodu, m.in. z obszarów położonych w pobliżu analizowanego punktu przytaczanych wyżej sondowań atmosfery. Powietrze to było coraz bardziej suche, powoli ulegało transformacji i przyjmowało cechy

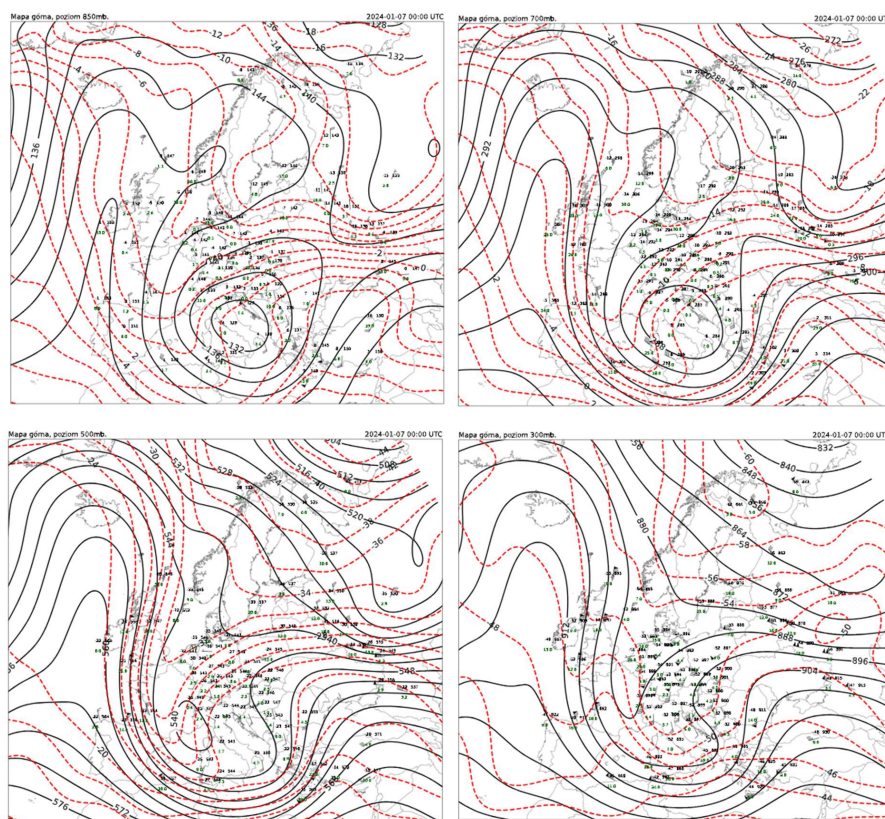
powietrza kontynentalnego, co widoczne jest na obrazie satelitarnym. Południe Polski pozostawało jedynie w oddziaływaniu frontu, który również ułożył się równoleżnikowo i praktycznie „oparł się” o góry (rys. 51 i 52).



Rys. 51. Mapa synoptyczna Europy z dn. 07.01.2024 z godz 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)



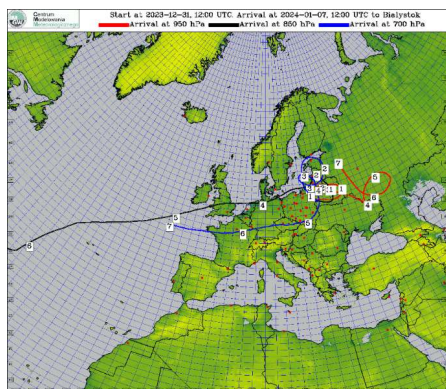
Rys. 52. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 07.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)



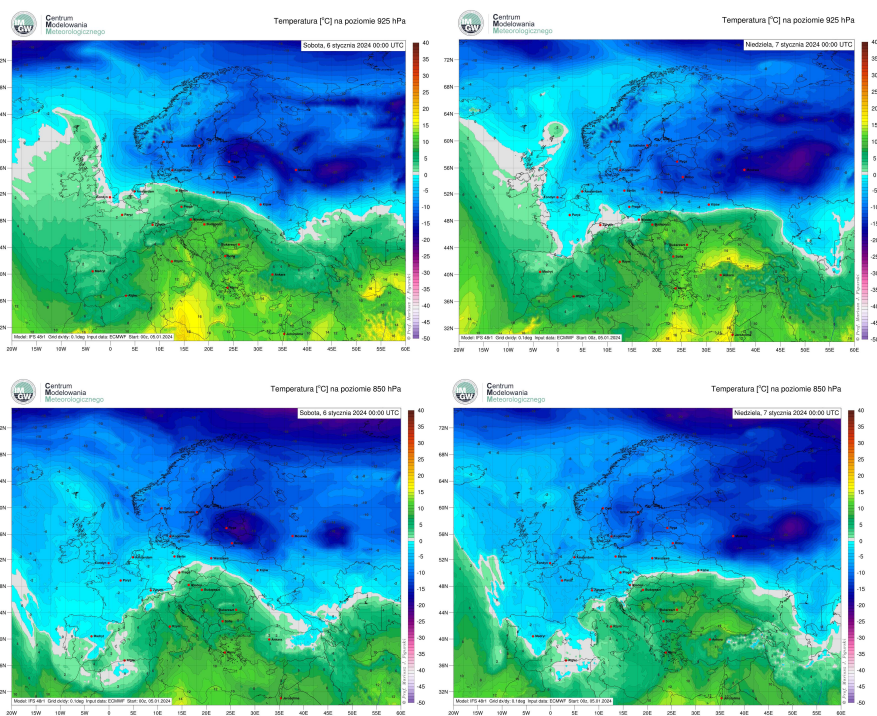
Rys. 53. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 07.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

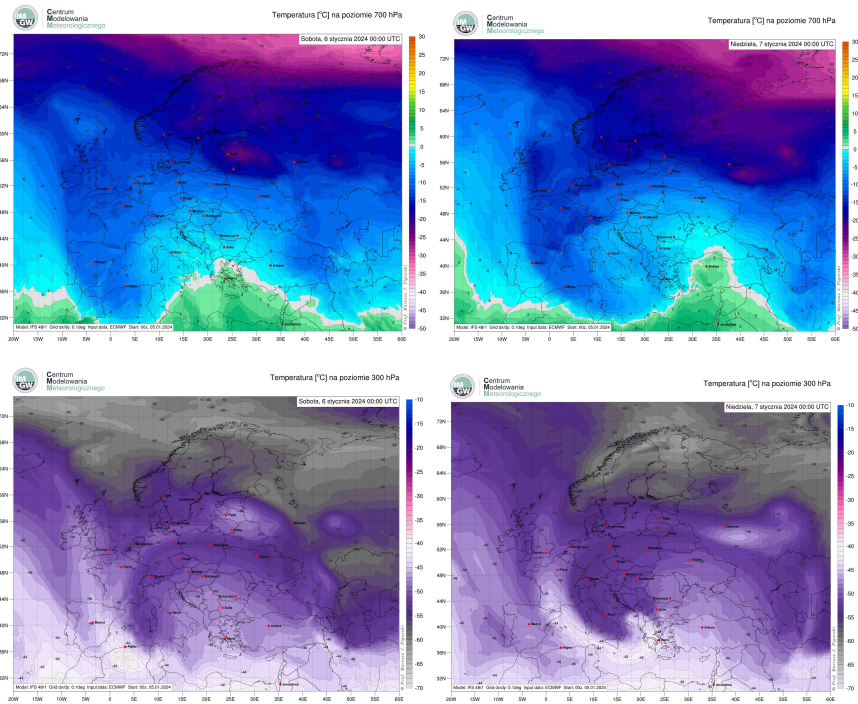
Na mapach TB, do wysokości 500 hPa, widoczna jedna zamknięta cyrkulacja cykloniczna. Jest ona związana z niżem znajdującym nad Włochami, który był średnim układem barycznym. Wyżej dobrze wyrażona zatoka.

Adwekcja chłodnego powietrza szczególnie zaznaczyła się w dolnych częściach troposfery (poziom 950 hPa) (rys. 54).



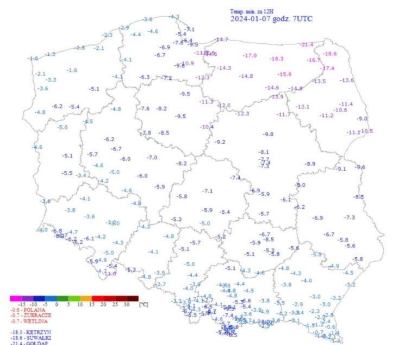
Rys. 54. Trajektoria wsteczna masy powietrza dla 07.01.2024 godz. 12 UTC dla Białegostoku (<http://cmm.imgw.pl> – dane operacyjne).





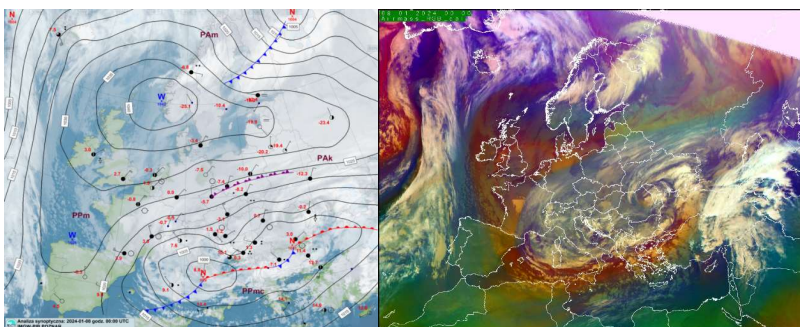
Rys. 55. Progностyczne mapy pola temperatury na poziomie 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 300 hPa, 06-07.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

Kiedy przeanalizuje się mapy pola temperatury na poszczególnych poziomach to rzeczywiście do poziomu 850 hPa adwekcja chłodu jest bardzo wyraźna. Na ww. poziomach zaznaczony jest wyparcie ciepłego powietrza poza południowe granice kraju. Wyżej adwekcja słabo zaznaczona. Tego poranka ujemne wartości temperatury wystąpiły już w całej Polsce, jednak najniższe pojawiły się na północnym wschodzie. Stacje pomiarowe zarejestrowały tam o godzinie 6:00 UTC liczne wartości poniżej  $-10^{\circ}\text{C}$ , a postereunek w Góldapi zanotował aż  $-21,4^{\circ}\text{C}$  (rys. 56). Znaczące jest też to, że z każdą kolejną godziną temperatura w niektórych miejscach jeszcze spadała. Spowodowane to było m.in. dalszym umacnianiem się wyżu oraz osuszaniem powietrza.



Rys. 56. Mapa rozkładu temperatury minimalnej o godz. 6:00 UTC dn. 7.01.2024 (źródło własne IMGW).

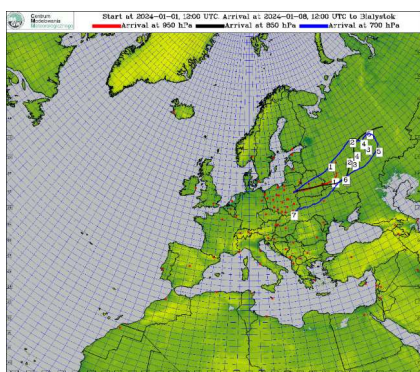
8.01.2024 wyż północnoeuropejski umocnił się jeszcze bardziej (1042 hPa), a jego centrum przesunęło w kierunku Norwegii. Nad Polską centralną zaznaczył się słabo wyrażony front okluzji. Powietrze napływało do Polski z północnego wschodu. Na mapach znaczone już było jako arktyczne kontynentalne (Rys. 57 i 58).



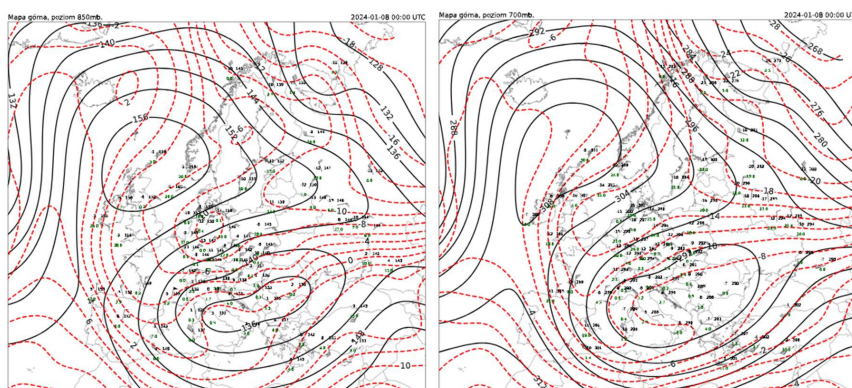
Rys. 57. Mapa synoptyczna Europy z dn. 08.01.2024 z godz 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)

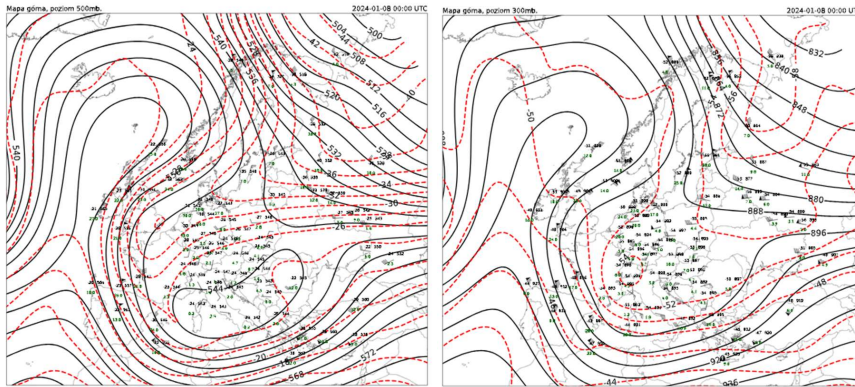
Rys. 58. Obraz satelitarny – produkt Airmass – z dn. 08.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)

Z komentarzem [MZ1]: Bardziej nawet południowo-wschodnią chyba? Tak spoglądam na mapę. To by też bardziej pasowało do szerszego już wlewu arktycznej masy powietrza z ujemną temperaturą w całej Polsce



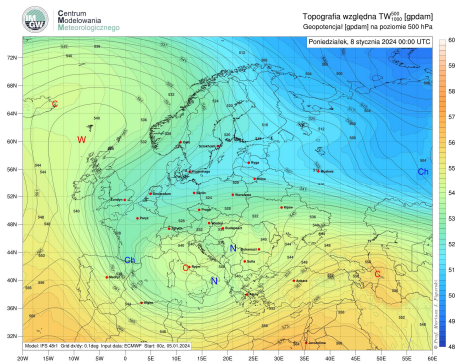
Rys. 59. Trajektoria wsteczna masy powietrza dla 08.01.2024 godz. 12 UTC dla Białegostoku (<http://cmm.imgw.pl> – dane operacyjne).





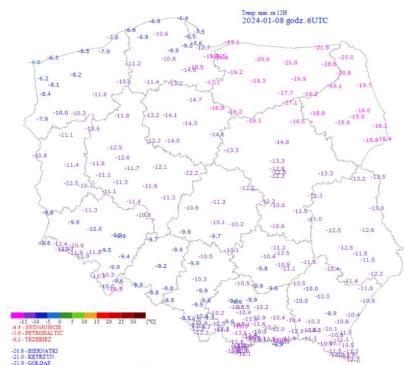
Rys. 60. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 08.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

Umacniający się wyż rozbudował się ku górze i na wyższych poziomach TB850 oraz TB700 była już widoczna samodzielna cyrkulacja antycyklonalna. Wyżej izohipsy gięte były na kształt klina. Na południu Europy również do poziomu TB500 wyodrębniona cyrkulacja cyklonalna. Jest ona związana z niżem zalegającym nad Włochami.

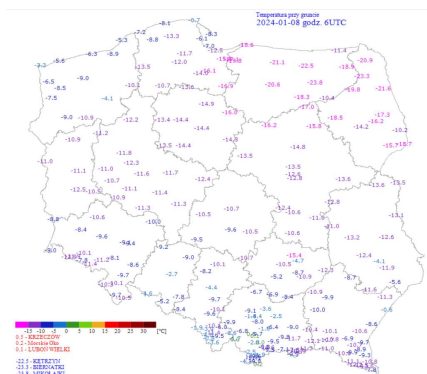


Rys. 61. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 08.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

Polska północna była w zasięgu zatoki chłodu. Według prognozy numerycznej średnia temperatura warstwy o grubości 500 hPa wzrastała w kierunku południowym. Tego poranka na północnym wschodzie, gdzie było zdecydowanie mniej chmur albo nawet bezchmurne niebo przez długi czas, wiele stacji pomiarowych o godzinie 6:00 UTC zarejestrowało już temperaturę poniżej  $-20^{\circ}\text{C}$ : Goldap, Suwałki i Biernatki (podlaskie), Kętrzyn i Lidzbark Warmiński (warmińsko-mazurskie). Prawie w całej Polsce wartości temperatury osiągnęły bądź przekroczyły  $-10^{\circ}\text{C}$ . Pas nadmorski jedynie pozostawał w nieco łagodniejszej strefie, tam wartości temperatury oscylowały wokół  $-6^{\circ}\text{C}/-5^{\circ}\text{C}$  (rys. 62).

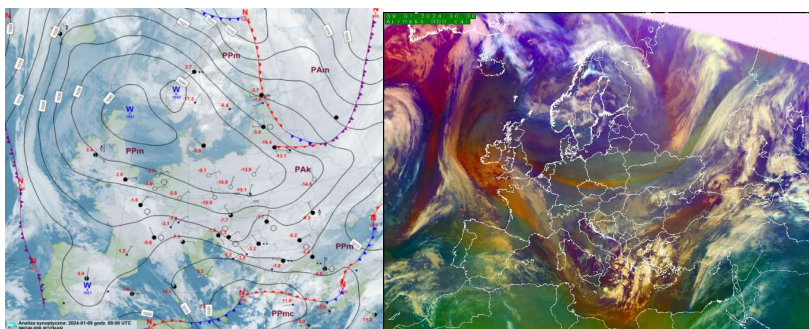


Rys. 62. Mapa rozkładu temperatury minimalnej o godz. 6:00 UTC dn. 8.01.2024 (źródło własne IMGW).  
Temperatura przy gruncie była w wielu miejscach jeszcze niższa (rys. 63).



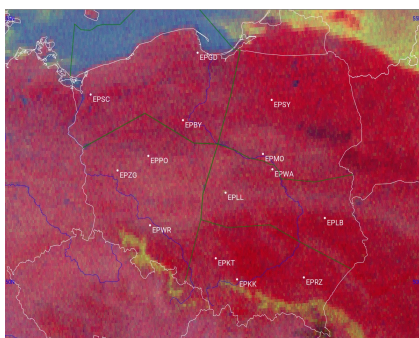
Rys. 63. Mapa rozkładu temperatury minimalnej na wys. 5 cm nad gruntem o godz. 6:00 UTC dn. 8.01.2024 (źródło własne IMGW).

**9.01.2024** nastąpiła kulminacja mroźów. Wyż znad Skandynawii wciął się klinem na obszar całej Polski. Utworzyły się dwa wyraźne centra: nad Norwegią (1042 hPa) i nad Szwecją (1041 hPa). Nad Polską zalegało powietrze arktyczne kontynentalne. Gradient baryczny się mocno zmniejszył i praktycznie cała Polska znalazła się w osi klina wspomnianego wyżu (osłabił wiatr lub momentami było bezwietrznie) (rys. 64). Powietrze mocno się osuszyło i było wyraźnie mroźne, co na produkcie satelitarnym Airmass (rys. 65) pokazują kolory w odcieniach coraz bardziej chłodnych, z odcieniami niebieskiego i fioletu. Bezchmurna noc potwierdzają też zobrazowania satelitarne uwzględniające mikrofizykę atmosfery, gdzie kolor ciemny różowy świadczy o braku chmur (rys. 66).

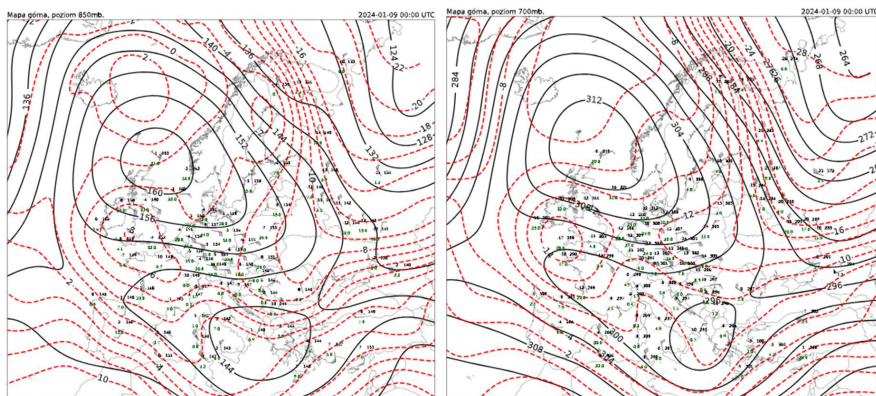


Rys. 64. Mapa synoptyczna Europy z dn. 09.01.2024 z godz 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)

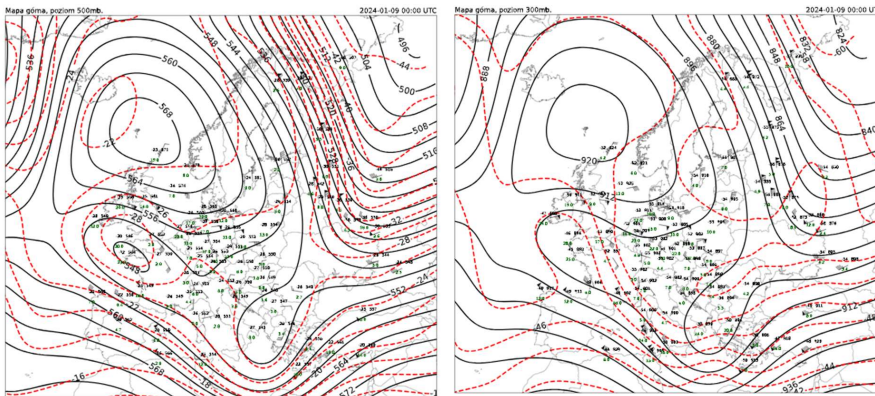
Rys. 65. Obraz satelitalny – produkt Airmass – z dn. 09.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)



Rys. 66. Obraz satelitalny – produkt Microphysics Night – z dn. 09.01.2024 z godz. 00 UTC (źródło własne IMGW)

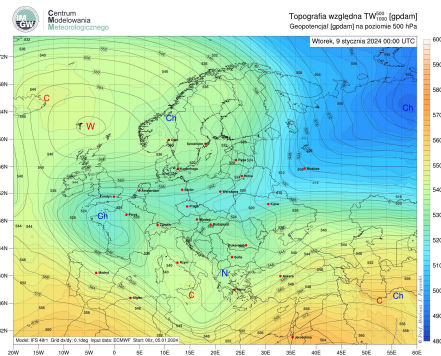






Rys. 67. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 09.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

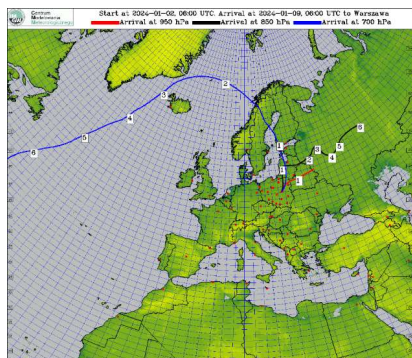
Dwucentrowy układ antycyklonalny na poziomie morza dobrze wyrażony w całej troposferze, na których zaznaczona jest jednocetrowa cyrkulacja cyklonalna. Nad Skandynawią i zachodnią Rosją na wszystkich poziomach występował duży horyzontalny gradient temperatury i geopotencju co wskazuje na występowanie strefy frontu atmosferycznego. Nad obszarem tym występował ujemny kąt adwekcji wskazujący na występowanie adwekcji ciepła, czy zalegający w zatoce front atmosferyczny miał charakter frontu ciepłego.



Rys. 68. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 09.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

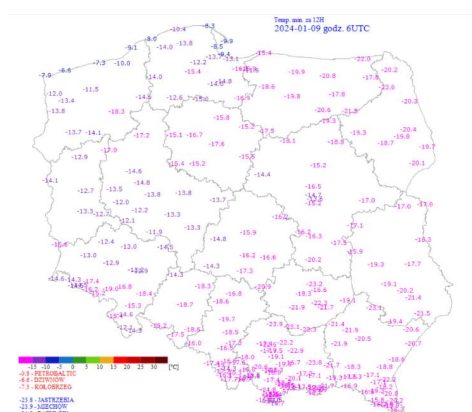
Według prognoz numerycznych oś zatoki chłodu przemieszczała się z północy na południe. Z północnego zachodu należało spodziewać się klina ciepła.

Trajektorie wsteczne masy powietrza wskazują na napływ powietrza z nad wychłodzonych obszarów wschodniej Europy na poziomach 950 hPa i 850 hPa. W środkowej troposferze zauważalny był już jednak proces zapoczątkowania adwekcji cieplejszej masy powietrza polarnego morskigo, zwiastujący zmianę sytuacji barycznej w kolejnych dniach (rys. 69).



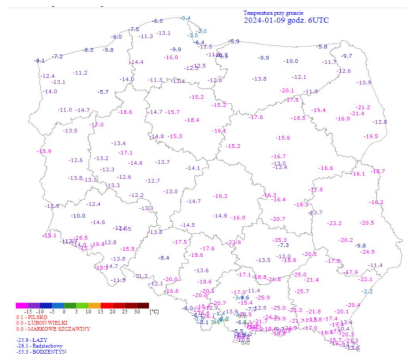
Rys. 69. Trajektoria wsteczna masy powietrza dla 09.01.2024 godz. 06 UTC dla Warszawy – napływ wychłodzonego powietrza arktycznego o cechach kontynentalnych z nad wschodniej Europy dla poziomów 950 hPa i 850 hPa i adwekcja cieplejszej masy na 700 hPa (<http://cmm.imgw.pl> – dane operacyjne).

Sytuacja taka zaowocowała bardzo silnym mrozem w całym kraju. O godzinie 6:00 UTC najniższe wartości temperatury wystąpiły w Ratulowie  $-24,8^{\circ}\text{C}$ , Miechowie  $-23,9^{\circ}\text{C}$  i Jastrzębi 23,8°C (małopolskie), jednak w całej Polsce były liczne wartości oscylujące wokół  $-20^{\circ}\text{C}$ . Rozbieżności w pomiarach podyktowane były zapewne lokalnymi warunkami (rys. 70).



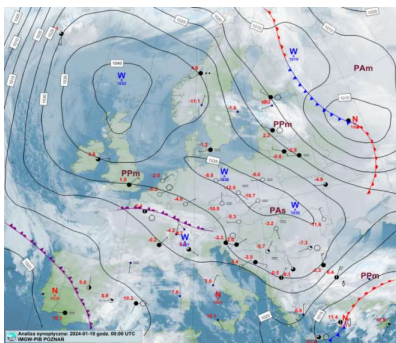
Rys. 70. Mapa rozkładu temperatury minimalnej o godz. 6:00 UTC dn. 9.01.2024 (źródło własne IMGW).

Temperatura przy gruncie była jeszcze niższa i osiągała nawet  $-35,3^{\circ}\text{C}$ , jak na posterunku w Bodzentynie (świętokrzyskie) (rys. 71).

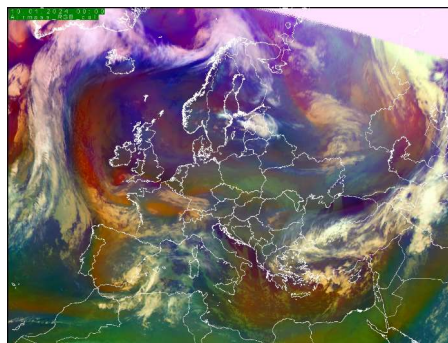


Rys. 71. Mapa rozkładu temperatury minimalnej na wys. 5 cm nad gruntem o godz. 6:00 UTC dn. 9.01.2024 (źródło własne IMGW)

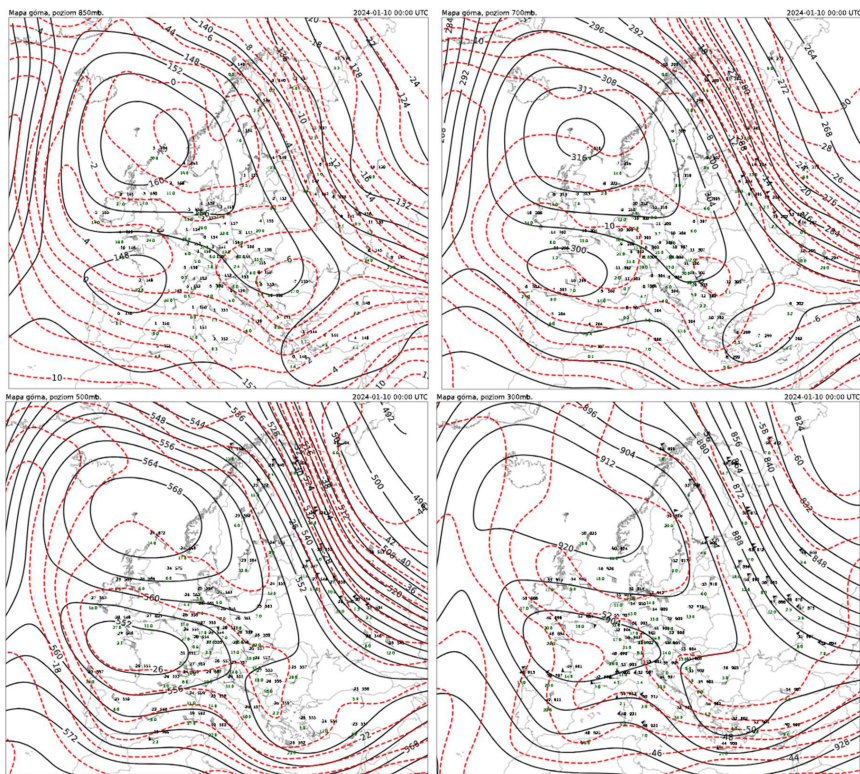
10.01.2024 sytuacja zaczęła się już zmieniać. Klin wyżowy nadal znajdował się nad Polską, ale został zepchnięty już nieco na południe i południowy zachód kraju. Utworzyły się w nim wtórne centra z wartościami 1036 hPa i utworzyły zamkniętą izobarę 1035 hPa rozciągającą się od Danii po Ukrainę i Rumunię. Od północnego zachodu natomiast zaczęła oddziaływać zatoka niżu z ośrodkiem nad zachodnią Rosją. Na południu kraju zalegało jeszcze powietrze arktyczne, od północy zaczęło być pompowane powietrze polarne, zdecydowanie wilgotniejsze (rys. 72, 73 i 77).



Rys. 72. Mapa synoptyczna Europy z dn. 10.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://meteo.imgw.pl/>)



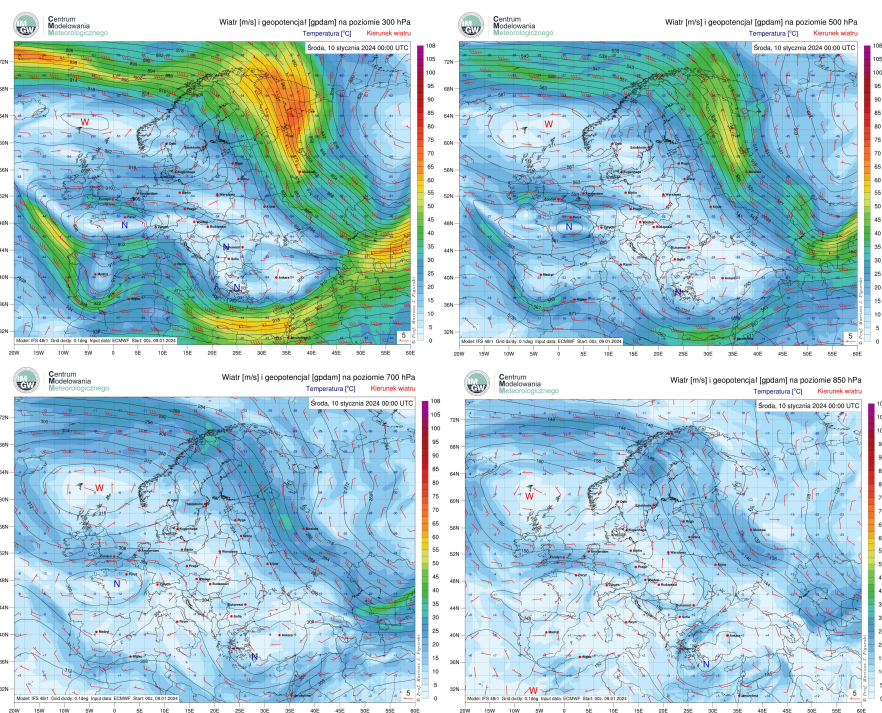
Rys. 73. Obraz satelitalny – produkt Airmass – z dn. 10.01.2024 z godz. 00 UTC (<https://view.eumetsat.int/>)



Rys. 74. Mapy topografii barycznej bezwzględnej TB, 10.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

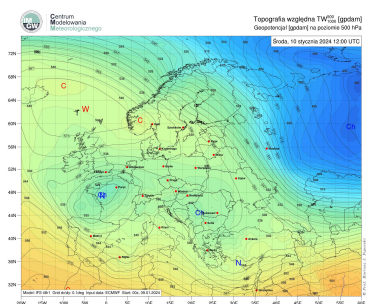
Wyż znad Morza Północnego był wysokim układem barycznym rozbudowanym do poziomu 300 hPa lub wyżej. Na wszystkich poziomach dobrze wyrażona cyrkulacja antycyklonalna. Dobrze wyrażona oś klina wyżu nad Polską.

Oś dobrze wyrażona na poziomach TB850 i TB700. Słabiej na poziomach TB500 oraz TB300. Nad Zatoką Biskajską oraz Francją widoczna cyrkulacja cykloniczna na poziomach TB850, TB700, TB500 oraz TB300.



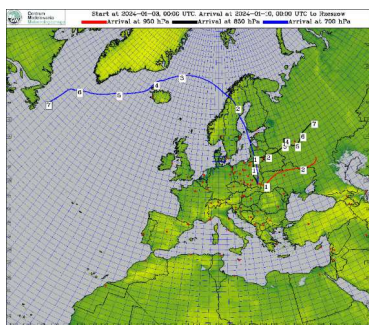
Rys. 75. Progностyczne pole wiatru i geopotencjału na poziomie 300 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, 10.01.2024 roku, godz. 00 UTC.

Taki rozkład układów barycznych zapewniał napływ powietrza z północy i północnego wschodu w górnej i środkowej troposferze.



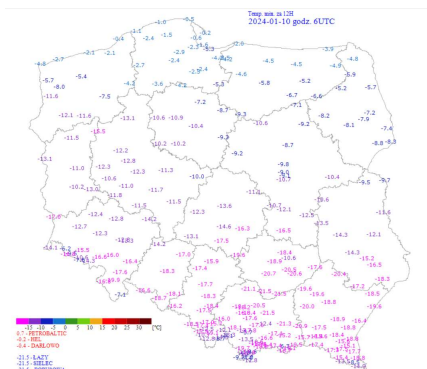
Rys. 76. Progностyczna mapa topografii barycznej względnej  $TW_{1000}^{500}$ , 10.01.2024 roku, godz. 12 UTC.

Na północy kraju zalegał klin ciepła. Średnia temperatura warstwy zmniejszała się w kierunku południowym.



Rys. 77. Trajektoria wsteczna masy powietrza dla 10.01.2024 godz. 00 UTC dla Rzeszowa (<http://cmm.imgw.pl> – dane operacyjne).

Ujemne wartości temperatury o poranku nadal były w całej Polsce, ale bardzo wyraźne rozgraniczenie pojawiło się między północą a południem. O godzinie 6:00 UTC na północy temperatura wyniosła od  $-0,2^{\circ}\text{C}$  do  $-10^{\circ}\text{C}$ . Im dalej na południe, tym było chłodniej. Najniższe wartości temperatury, kolejny raz w wielu punktach poniżej  $-20^{\circ}\text{C}$ , wystąpiły w pasie od wyżyn środkowopolskich po góry. Sprzyjało temu ukształtowanie terenu i pozostawanie w osi wyżu. Stacje w Borusowej, Sielcu i Łazach wskazały  $-21,5^{\circ}\text{C}$ . To była ostatnia doba w tym okresie z takimi niskimi wartościami, a w ciągu dnia na północy Polski pojawiły się już wskazania dodatnie temperatury (rys. 78).



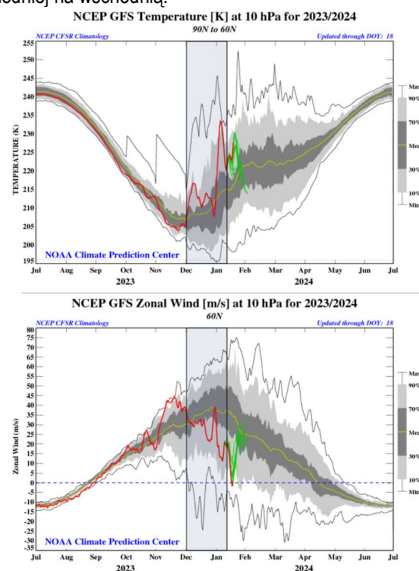
Rys. 78. Mapa rozkładu temperatury minimalnej o godz. 6:00 UTC dn. 10.01.2024 (źródło własne IMGW).

### Wir polarny i stratosferyczne ocieplenie

Stratosferyczny wir polarny oznacza obecność rozległego obszaru charakteryzującego się niskim ciśnieniem i temperaturą, a także przepływem powietrza w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. W sytuacji, gdy mamy do czynienia z dużymi prędkościami wiatru w obrębie wiru polarnego, zimne powietrze jest uwięzione w wysokich szerokościach i nad biegunami. Przesłanki wskazujące na jego słabnięcie pojawiły się już w grudniu 2023 roku, kiedy można było obserwować nagły wzrost temperatury i ciśnienia w stratosferze. Takie zdarzenie określa się jako „sudden stratospheric warming”, czyli nagłe ocieplenie stratosferyczne.

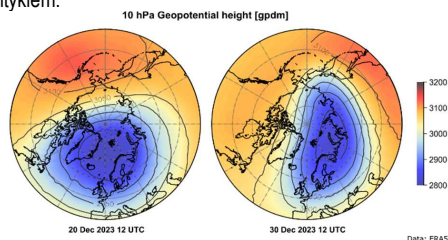
Dane z modelu NCEP GFS (rys. 79) pozwoliły wskazać na wzrost średniej temperatury z obszaru  $60^{\circ}\text{N}$ - $90^{\circ}\text{N}$  i spadek składowej strefowej wiatru z szerokości  $60^{\circ}\text{N}$  w środkowej stratosferze (poziom 10 hPa i wysokość ok. 30 km). Obserwowane tendencje miały miejsce już w grudniu, jednak w pierwszych dniach stycznia, temperatura powietrza gwałtownie wzrosła o około 30 K. Występujące w tym okresie znaczące spadki składowej strefowej wiatru

do wartości rzędu 12 m/s, były jednoznaczne z istotnym osłabieniem stratosferycznego wiru polarnego. W sytuacjach szczególnego osłabienia wiru, występować mogą ujemne wartości składowej strefowej wiatru, co oznacza odwrócenie cyrkulacji z zachodniej na wschodnią.



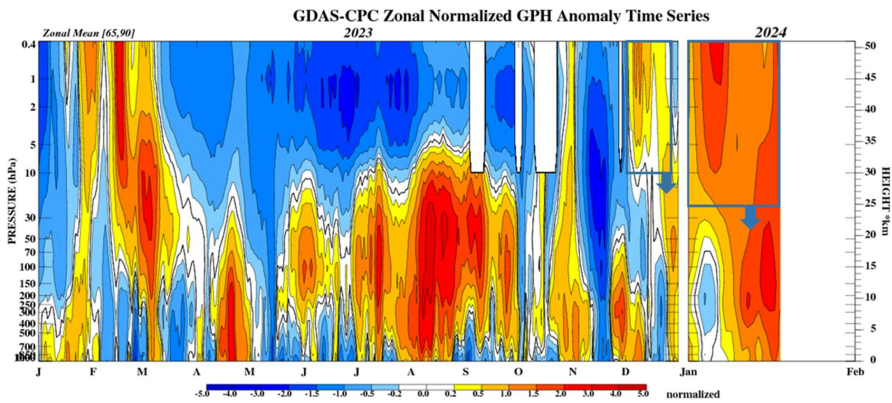
Rys. 79. Wartości temperatury (na górze) i składowej strefowej wiatru (na dole) z modelu NCEP GFS. Źródło grafik: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/SSW/>.

Wizualizacje wysokości geopotencjału na poziomie 10 hPa wskazują, że dnia 20 grudnia, obszar podwyższonego ciśnienia nad północnym Pacyfikiem spowodował przemieszczenie wiru polarnego w kierunku północnego Atlantyku i Europy (rys. 80). Wraz z upływem kolejnych dni, coraz większy obszar znajdował się pod wpływem podwyższonego ciśnienia. Pod koniec grudnia obszar wiru uległ wydłużeniu, obejmując północną Europę, Azję oraz zmniejszając swój zasięg nad Atlantykiem.



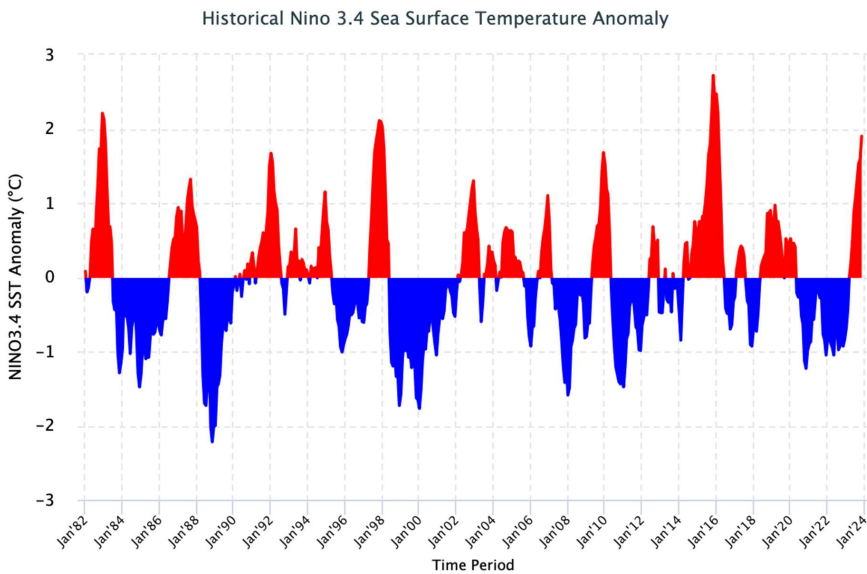
Rys. 80. Wysokość geopotencjału na poziomie 10 hPa dnia 20.12.2023 godz. 12 UTC (po lewej) i 30.12.2023 godz. 12 UTC (po prawej). Opracowanie własne na podstawie danych z reanalizy ERA 5 (<https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>).

Obserwowane tendencje i anomalie okazały się oddziaływać na cały pionowy profil. Ilustruje to wykres przedstawiający wartości anomalii ciśnienia w profilu pionowym (rys. 81). W połowie grudnia 2023 roku można było obserwować występowanie dodatnich anomalii w środkowej i górnej stratosferze (powyżej poziomu 10 hPa), co było związane ze wspomnianym już wzrostem temperatury i ciśnienia w tej warstwie atmosfery. Pod koniec grudnia i w pierwszych dniach stycznia, anomalia ciśnienia zaczęła dosięgać coraz niższych warstw, w tym także środkowej i dolnej troposfery, wpływając bezpośrednio na obserwowane warunki pogodowe.



Rys. 81. Wartości anomalii ciśnienia atmosferycznego (znormalizowane) z obszaru 65°N-90°N w pionowym profilu atmosfery w 2023 roku i styczniu 2024. Opracowanie własne na podstawie: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/strat-trop/>.

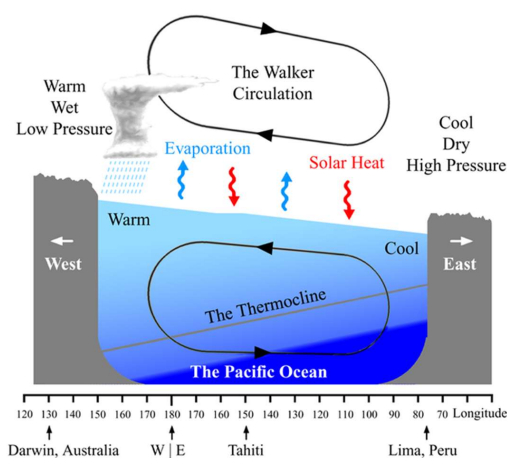
W drugiej połowie 2023 roku zaobserwowano w okolicy równika Oceanu Spokojnego rozwój ciepłej fazy ENSO (El Niño Southern Oscillation). ENSO to nieregularna, okresowa zmienność w rozkładzie przestrzennym wiatru oraz temperatury powierzchni Oceanu Spokojnego, która ma wpływ na pogodę i klimat obszarów tropikalnych i subtropikalnych. Historyczna zmienność anomalii temperatury, związanej z ENSO ukazana jest na rys. 82.



Rys. 82: Historyczna zmienność anomalii temperatury powierzchni Oceanu Spokojnego, związana z ENSO. Źródło Columbia Climate School.



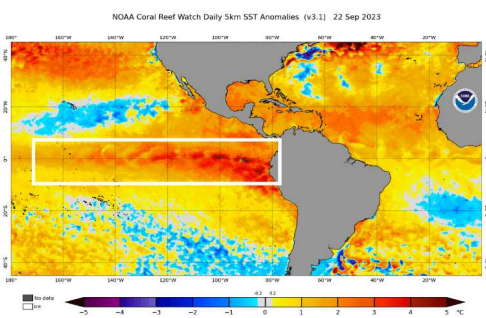
Ciepła faza ENSO to El Niño (w języku hiszpańskim chłopiec). Występuje ona, gdy powierzchnia centralnego i wschodniego Pacyfiku cechuje się wyższą od średniej temperaturą. Podczas El Niño pasaty ulegają osłabieniu lub więcej z innego niż wschodni kierunku, ograniczeniu ulega opad w Indonezji, Indiach i północnej Australii, a nad wodami Oceanu Spokojnego warunki sprzyjają formowaniu się cyklonów. Chłodna faza ENSO to La Niña (w języku hiszpańskim dziewczynka). Podczas jej trwania temperatura powierzchni centralnego i wschodniego Oceanu Spokojnego jest niższa od średniej. W takiej sytuacji nad Pacyfikiem obecne są silne pasaty skierowane od wybrzeża Ameryki Południowej w kierunku Indonezji, a u zachodniego wybrzeża Ameryki Południowej dochodzi do rozwoju zjawiska upwellingu. Obie fazy mają związek z cyrkulacją odkrytą przez Gilberta Walkera, która na Oceanie Spokojnym jest spowodowana przez obecność poziomego gradientu ciśnienia między wyżem, zlokalizowanym w rejonie wschodniego Pacyfiku a niżem Indonezyjskim.



Rys. 83: Cyrkulacja Walkera nad Pacyfikiem podczas La Niña. PAR. Licencja: domena publiczna.

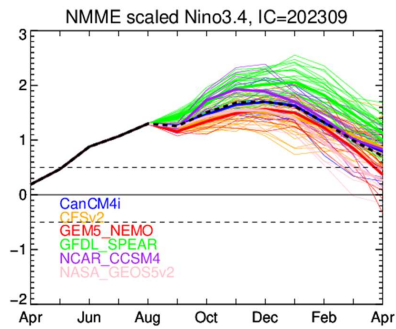
Cyrkulacja Walkera powoduje unoszenie chłodnych wód z głębi oceanu przy wybrzeżu, co powoduje ochłodzenie wód powierzchniowych. El Niño rozwija się, gdy cyrkulacja ta ulega osłabieniu, a La Niña podczas jej wzmocnienia.

Na rys.83, obrazującym rozkład przestrzenny anomalii temperatury powierzchni Oceanu Spokojnego można zauważyć wzorec dodatniej anomalii (zaznaczony białym prostokątem), charakterystyczny dla El Niño.



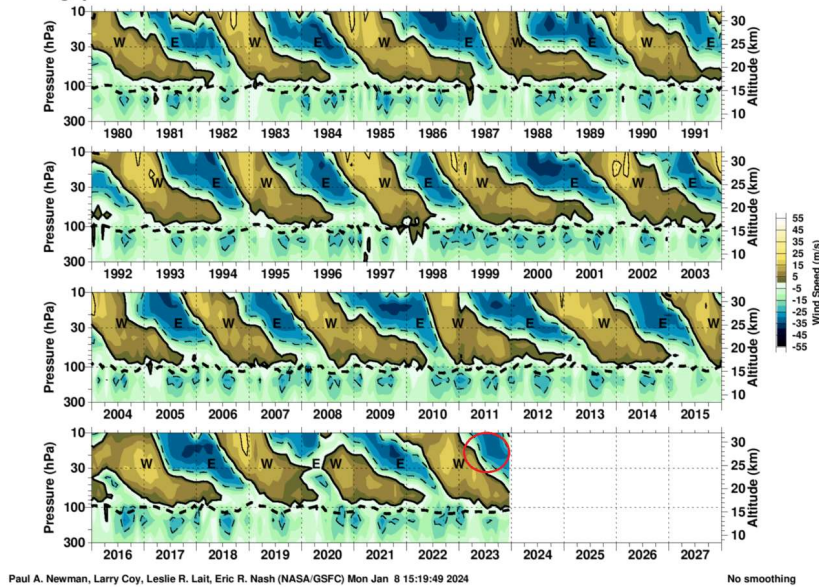
Rys. 84: Rozkład przestrzenny anomalii temperatury powierzchni Oceanu Spokojnego z wzorcem charakterystycznym dla El Niño.

Prognozy North American Multi Model Ensemble, dostarczane przez Climate Prediction Center (USA), wykonane we wrześniu 2023 wskazywały na wartość średniej wiązki anomalii temperatury powierzchni oceanu między 1,5 a 2 dla okresu od listopada 2023 do lutego 2024, co wskazywało na rozwój do umiarkowanego do silnego El Niño.



W poprzednich latach zaobserwowano fakt iż El Niño w połączeniu z wschodnią fazą QBO (Quasi-biennial oscillation) sprzyja osłabianiu wiru polarnego, co prowadzi do warunków korzystnych do sływania nad umiarkowane szerokości geograficzne arktycznych mas powietrza. Rozwój wschodniej fazy QBO można było obserwować od września 2023 co ukazuje poniższy schemat (zaznaczono fazę easterly w 2023 czerwonym okręgiem). Oscylacja quasi-dwuletnia (QBO) to tropikalna, dolna stratosferyczna, strefowa zmienność wiatru rozchodząca się w dół, o średnim okresie około 28 miesięcy. Poprzez modulację propagacji pozatropikalnych fal Rossbyego, QBO ma wpływ na zaburzenie stratosferycznego wiru polarnego i nasilenie zubożenia warstwy ozonowej na dużych szerokościach geograficznych.

**U S ngapore**



W – westerly (zachodnia: prędkości dodatnie), E – easterly (wschodnia: prędkości ujemne). Wytłuszczzona linia przerywana oznacza wysokość tropopauzy.

Podsumowując: we wrześniu zaobserwowano dwa globalne czynniki, umożliwiające osłabienie wiru polarnego: El nino oraz wschodnie QBO, co stanowiło przesłankę do obserwacji nagłego ocieplenia stratosferycznego w grudniu i napływ zimnego powietrza arktycznego nad Europę w styczniu.

