

Poznań
22.01.2024 r.

Jak powstają burze i tornada?

dr **Mateusz Taszarek**

Zakład Meteorologii i Klimatologii



Ministerstwo
Edukacji i Nauki



UNIwersytet
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU



Wydział Nauk
Geograficznych i Geologicznych

Kilka słów o prowadzącym...

Specjalizacja: meteorologia, klimatologia, zjawiska konwekcyjne

- 2007 - V LO im. Klaudyny Potockiej w Poznaniu (profil geograficzny)
- 2010 - Studia licencjackie na WNGiG UAM (geografia)
- 2012 - Studia magisterskie na WNGiG UAM (geografia)
- 2017 - Studia doktoranckie na WNGiG UAM (nauki o Ziemi)
- Ponad 4 lata w NOAA/NSSL oraz CIMMS (Norman, Oklahoma)
- Uczestnik 9 grantów badawczych (4 jako kierownik)
- Ponad 40 publikacji naukowych
- Członek ESSL, Skywarn Poland
- Doświadczenie w operacyjnym prognozowaniu pogody



Dzisiejsza prezentacja:

- Jakie procesy fizyczne odpowiadają za rozwój burz?
- Jakie rodzaje burz wyróżniamy?
- Które czynniki decydują o intensywności burzy?
- Jak zmiany klimatu wpływają na burze?



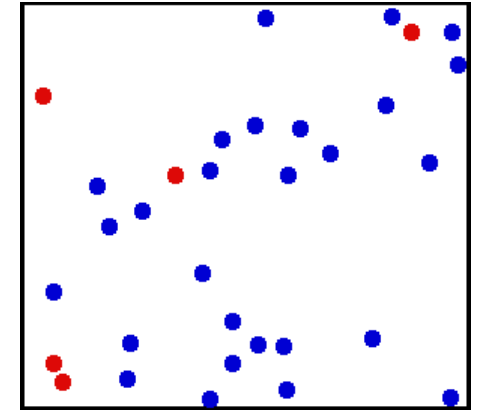
Konwekcja

- Pionowe ruchy cieczy lub powietrza wskutek działania sił ciężkości oraz wyporu hydrostatycznego.
- Ruchy konwekcyjne zachodzą jednocześnie w górę i w dół.
- Zachodzi, gdy na tym samym poziomie występują różnice gęstości spowodowane np. różnicą temperatury lub wilgotności.



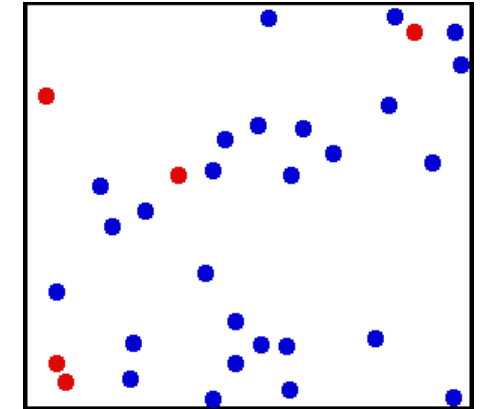
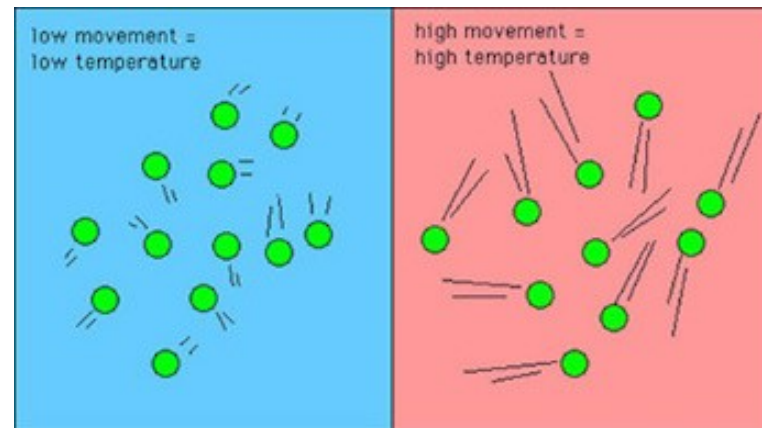
Konwekcja

- Jednym z podstawowych elementów fizycznych, określający stan cieplny atmosfery jest energia kinetyczna cząstek powietrza (temperatura).



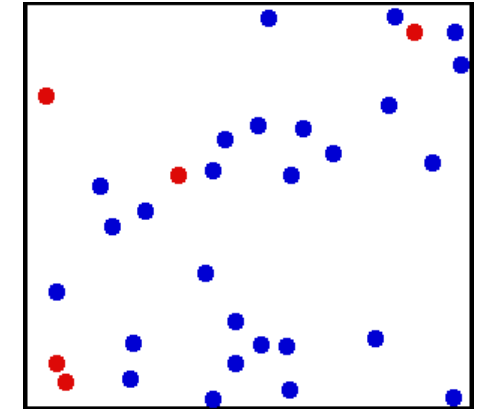
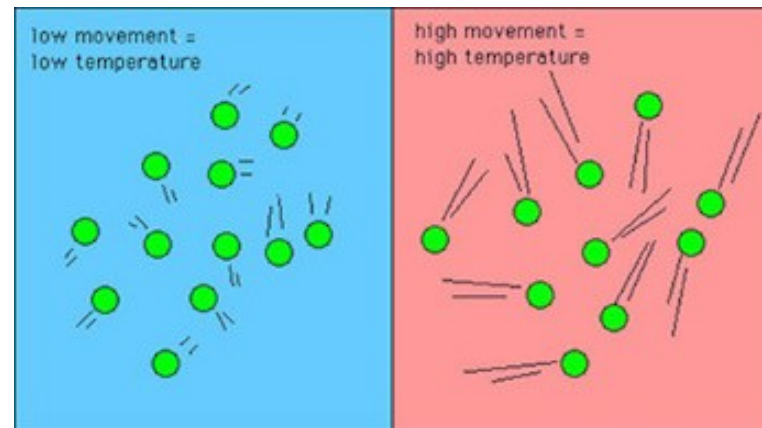
Konwekcja

- Jednym z podstawowych elementów fizycznych, określający stan cieplny atmosfery jest energia kinetyczna cząstek powietrza (temperatura).
- Powietrze ciepłe (rzadkie)
- Powietrze chłodne (gęste)



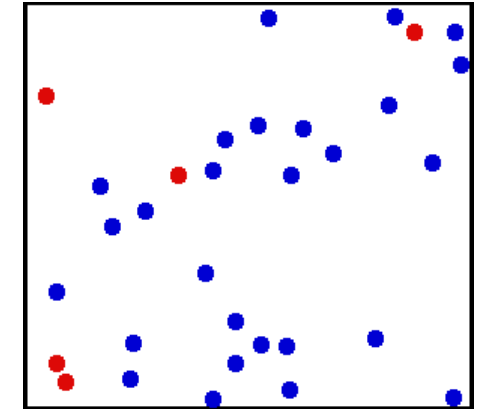
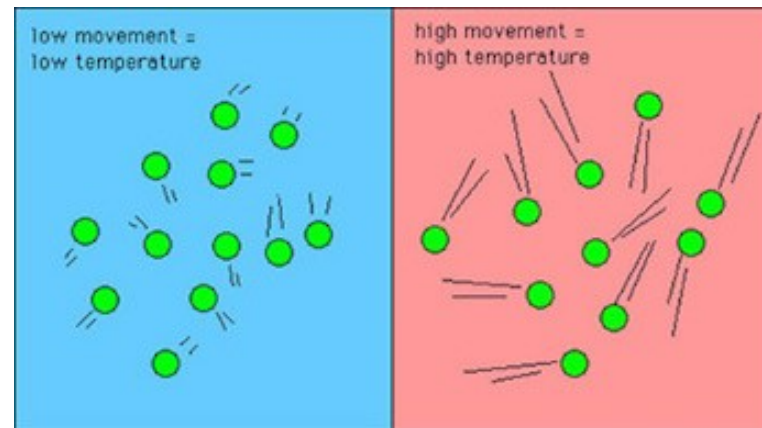
Konwekcja

- Jednym z podstawowych elementów fizycznych, określający stan cieplny atmosfery jest energia kinetyczna cząstek powietrza (temperatura).
- Powietrze ciepłe (rzadkie)
- Powietrze chłodne (gęste)
- Powietrze ciepłe LEKKIE
- Powietrze chłodne CIĘŻKIE

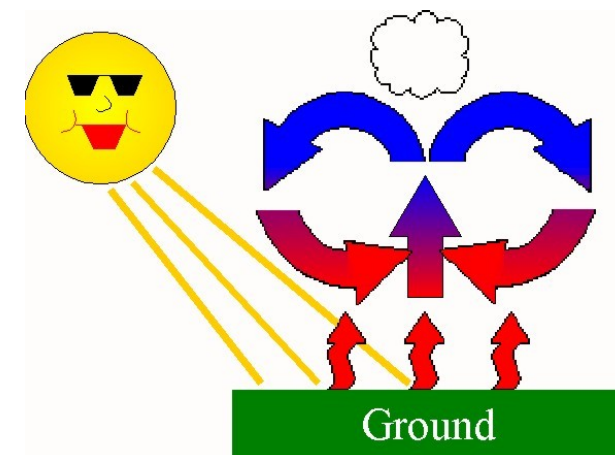


Konwekcja

- Jednym z podstawowych elementów fizycznych, określający stan cieplny atmosfery jest energia kinetyczna cząstek powietrza (temperatura).
- Powietrze ciepłe (rzadkie)
- Powietrze chłodne (gęste)
- Powietrze ciepłe LEKKIE
- Powietrze chłodne CIĘŻKIE

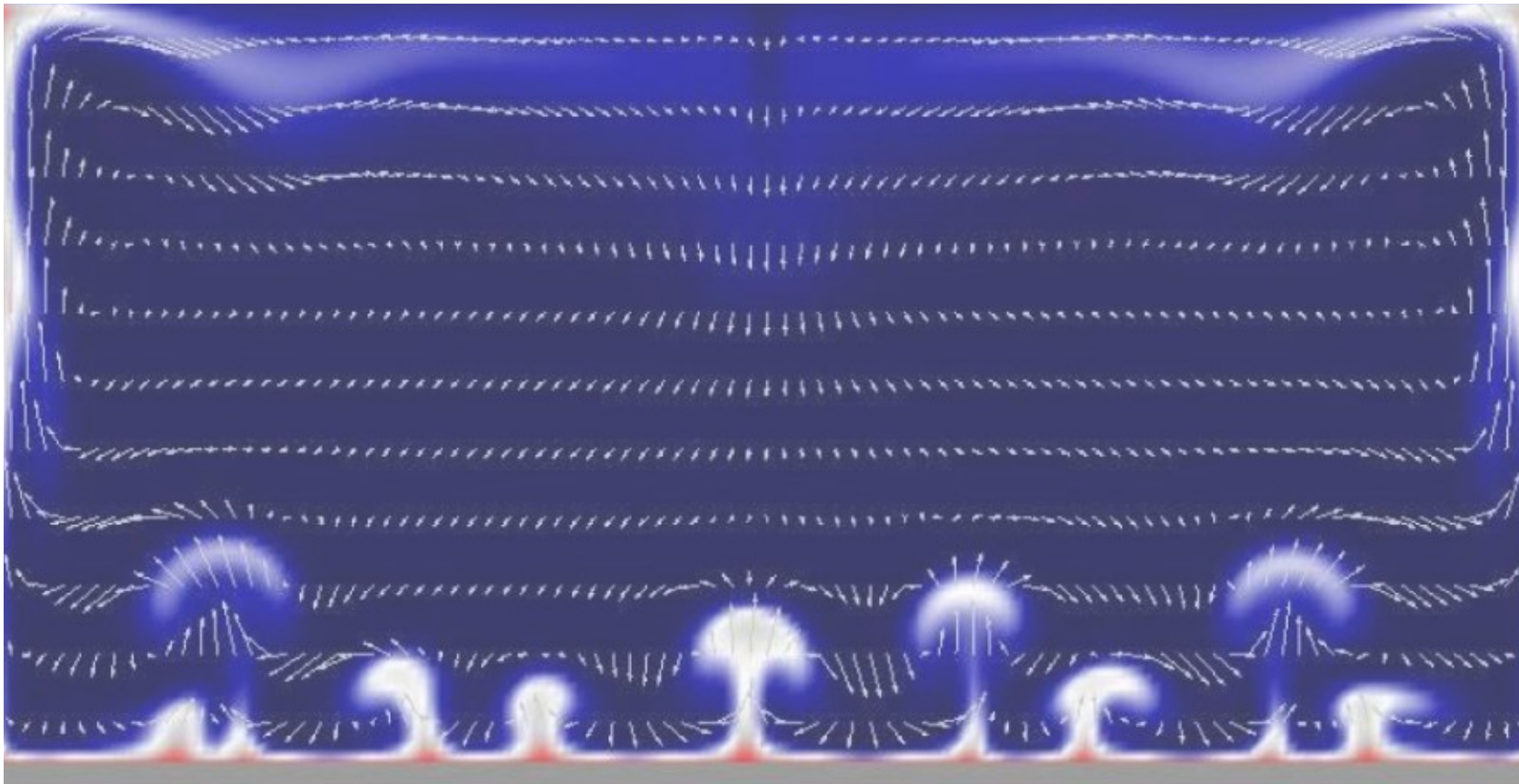


CIEPŁE POWIETRZE POSIADA DODATNIĄ WYPORNOŚĆ WZGLĘDEM CHŁODNEGO!



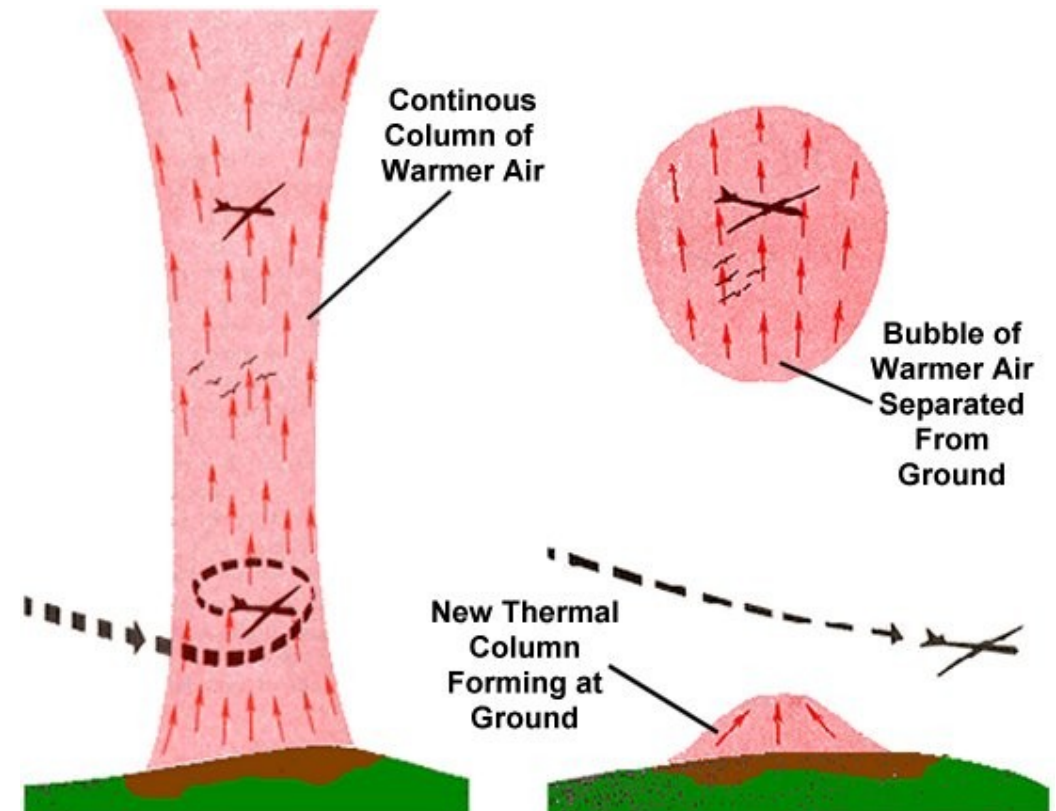
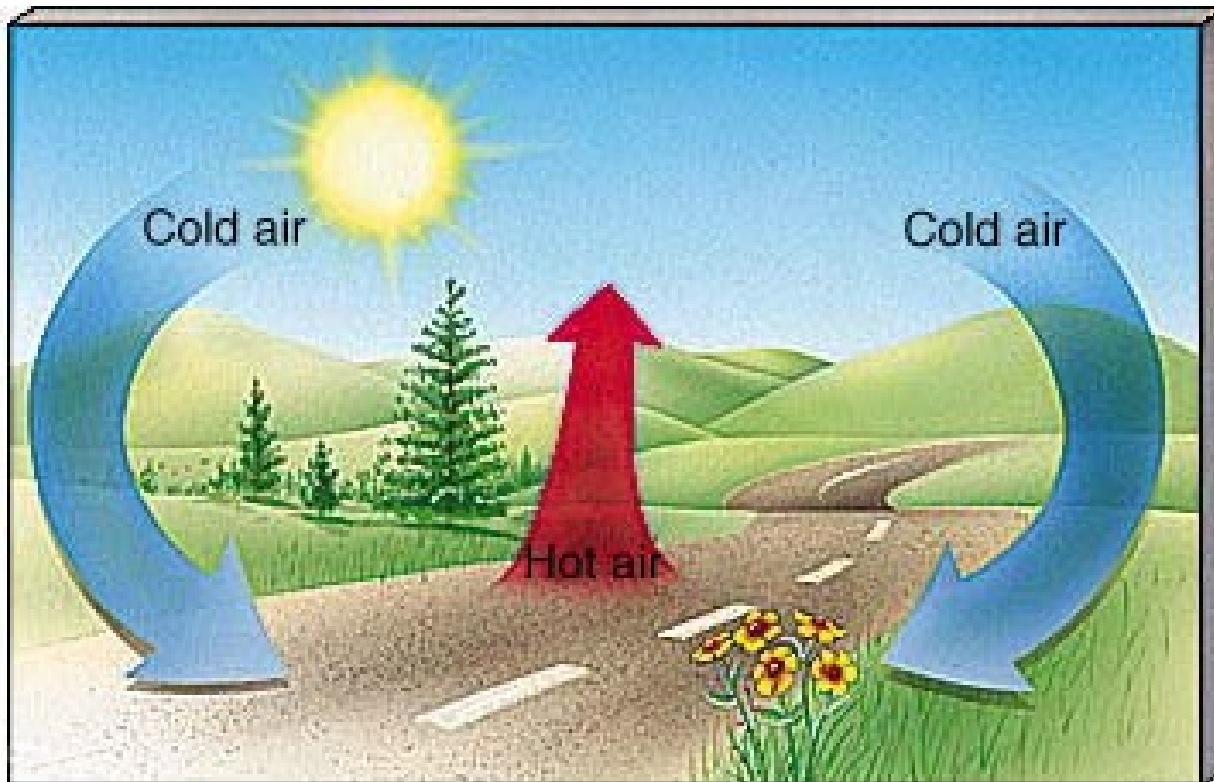
Konwekcja

- Prądy konwekcyjne możemy wyobrazić sobie jako pęcherze lub zorganizowane strugi powietrza unoszące się do góry.



Konwekcja

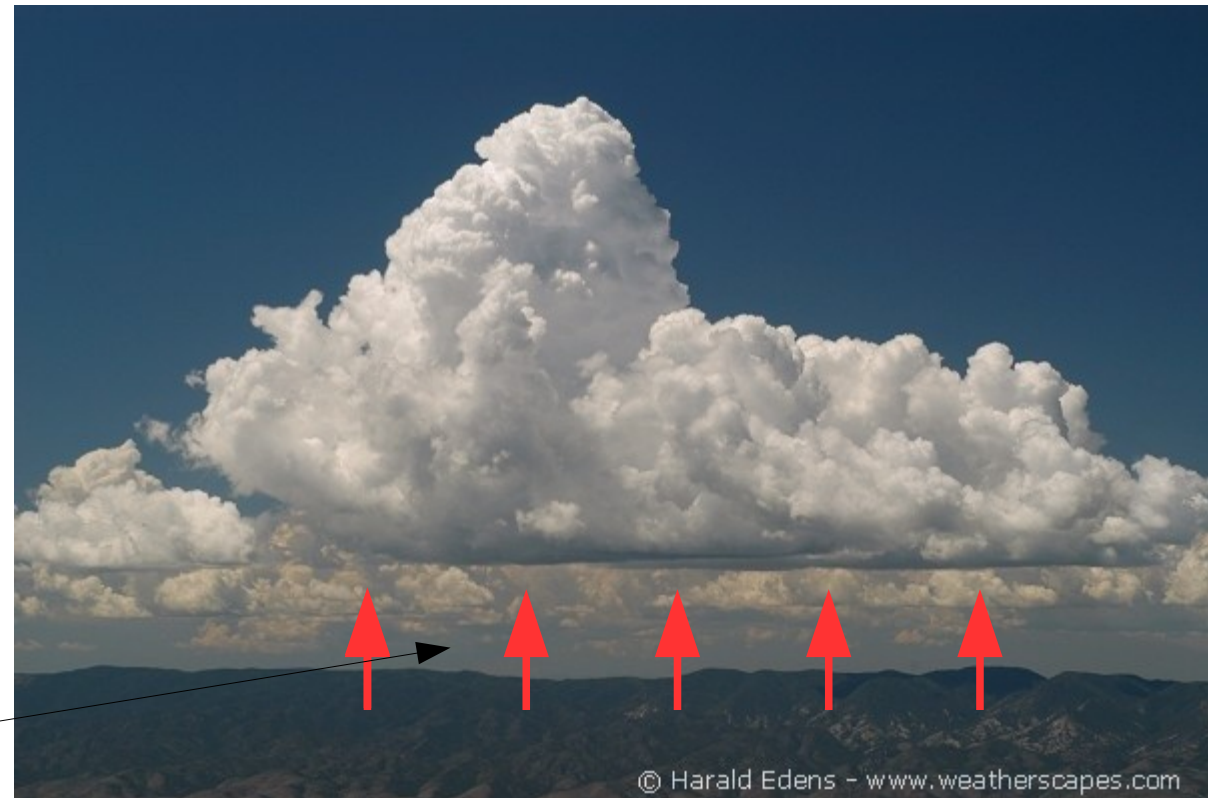
- Gdy nie dochodzi do kondensacji pary wodnej, mówimy o konwekcji suchej (tzw. termale). Jest ona wykorzystywana przez szybowce.



Konwekcja

- Gdy jednak termale osiągają poziom kondensacji pary wodnej, dochodzi do powstania konwekcji wilgotnej (wilgotność względna = 100%).

Konwekcja sucha

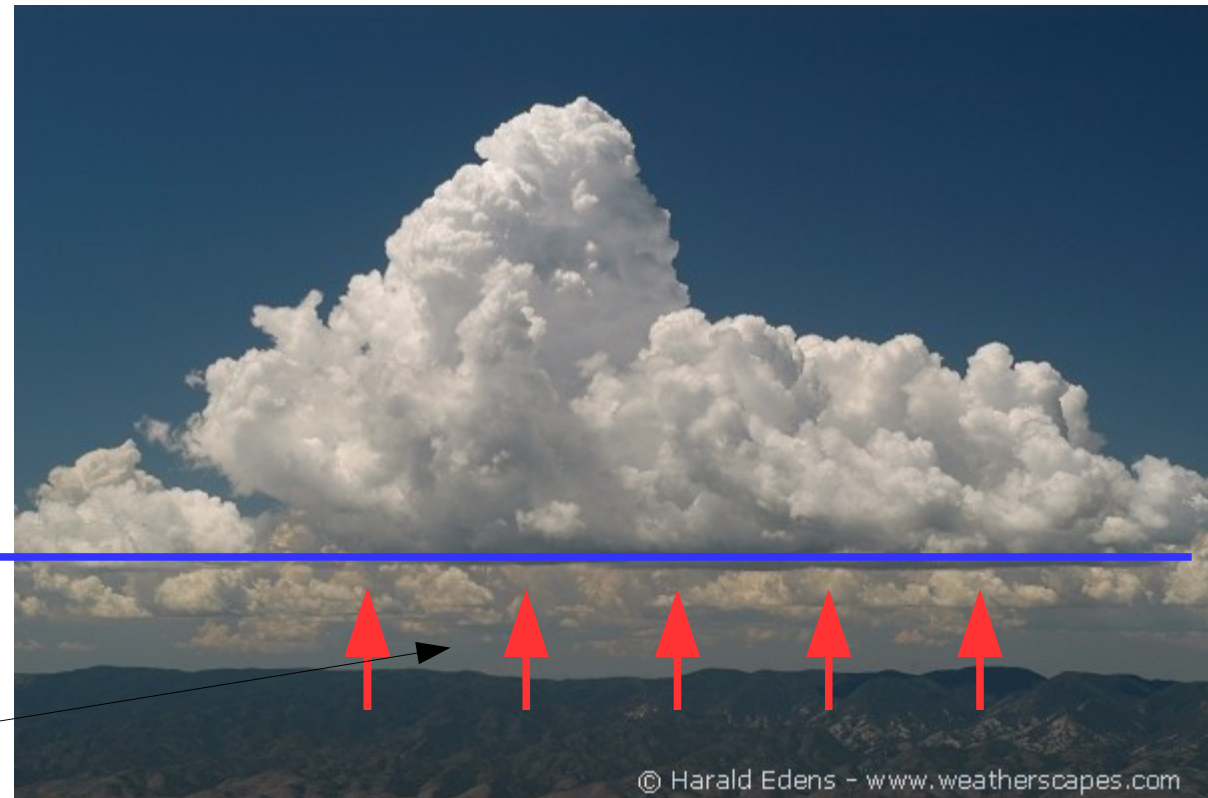


Konwekcja

- Gdy jednak termale osiągają poziom kondensacji pary wodnej, dochodzi do powstania konwekcji wilgotnej (wilgotność względna = 100%).

Poziom kondensacji pary wodnej
(ang. *lifted condensation level* - **LCL**)

Konwekcja sucha



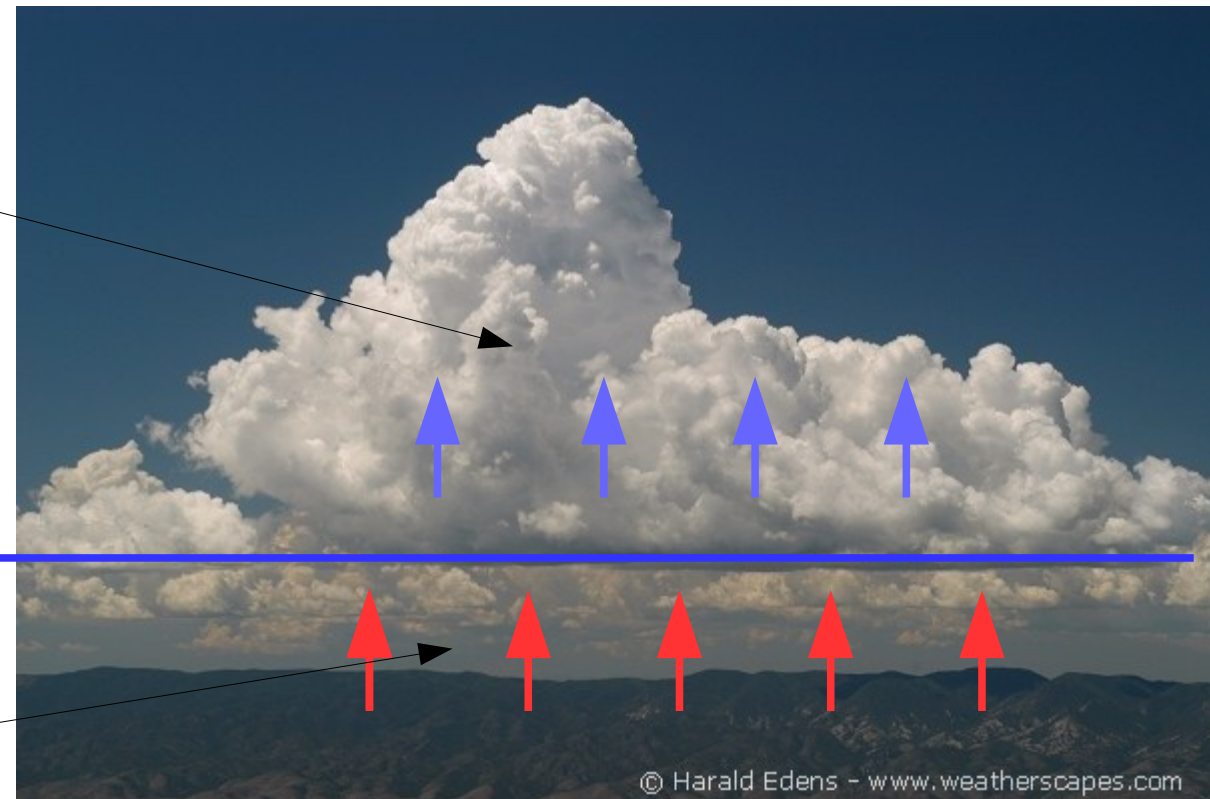
Konwekcja

- Gdy jednak termale osiągają poziom kondensacji pary wodnej, dochodzi do powstania konwekcji wilgotnej (wilgotność względna = 100%).

Konwekcja wilgotna

Poziom kondensacji pary wodnej
(ang. *lifted condensation level* - **LCL**)

Konwekcja sucha



Konwekcja



Cumulus mediocris

Konwekcja

- W sprzyjających warunkach energia wydzielana podczas kondensacji pary wodnej może doprowadzić do powstania głębokiej konwekcji. Prądy wstępujące mogą wtedy osiągać prędkość nawet kilkudziesięciu m/s!



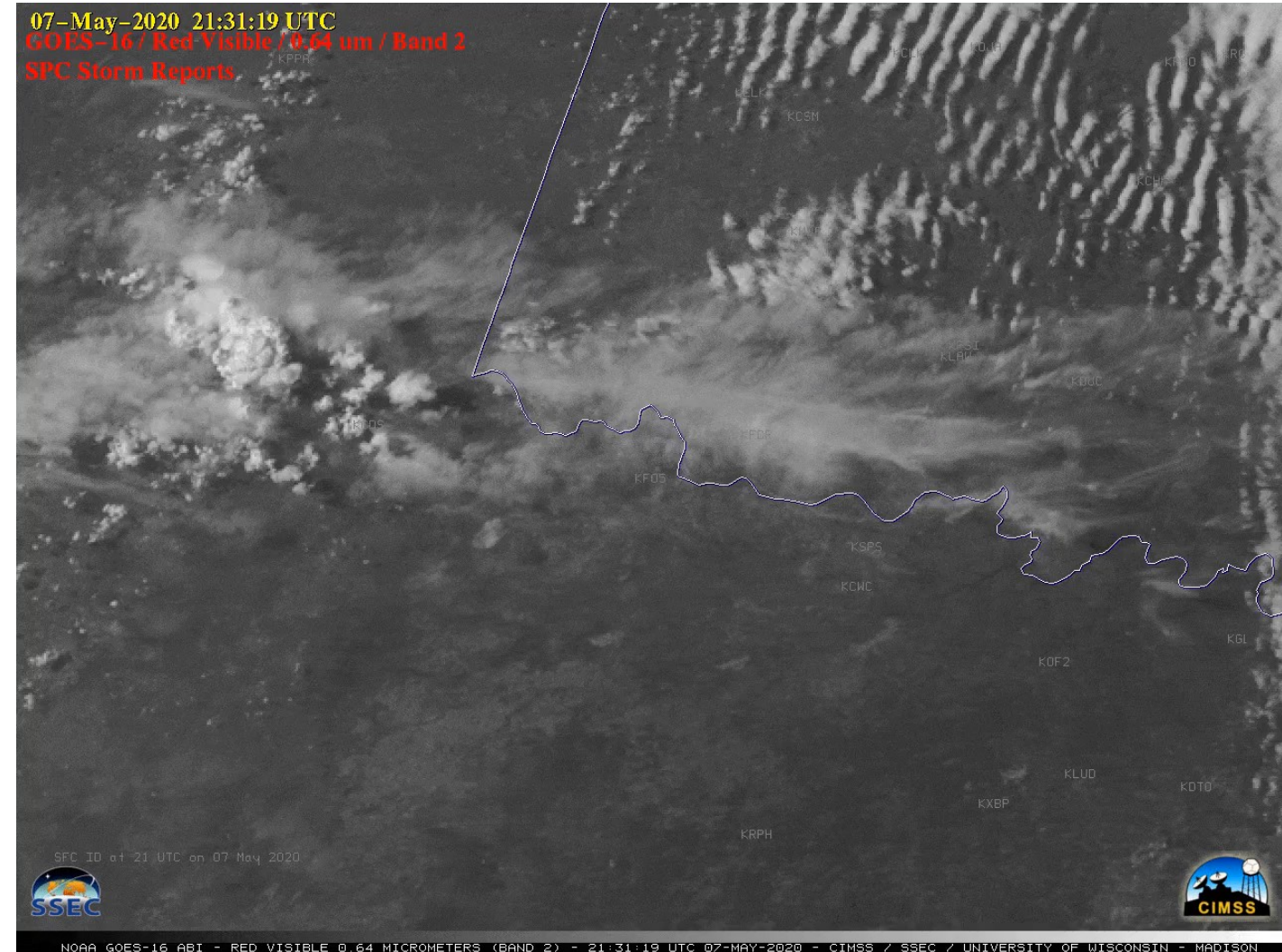
Konwekcja

- Na wysokości, gdzie temperatura unoszącego się powietrza zrównuje się z temperaturą powietrza otaczającego (ang. *equilibrium level* - **EL**), siła inercji prądu wstępującego prowadzi do powstania formacji kowadła.



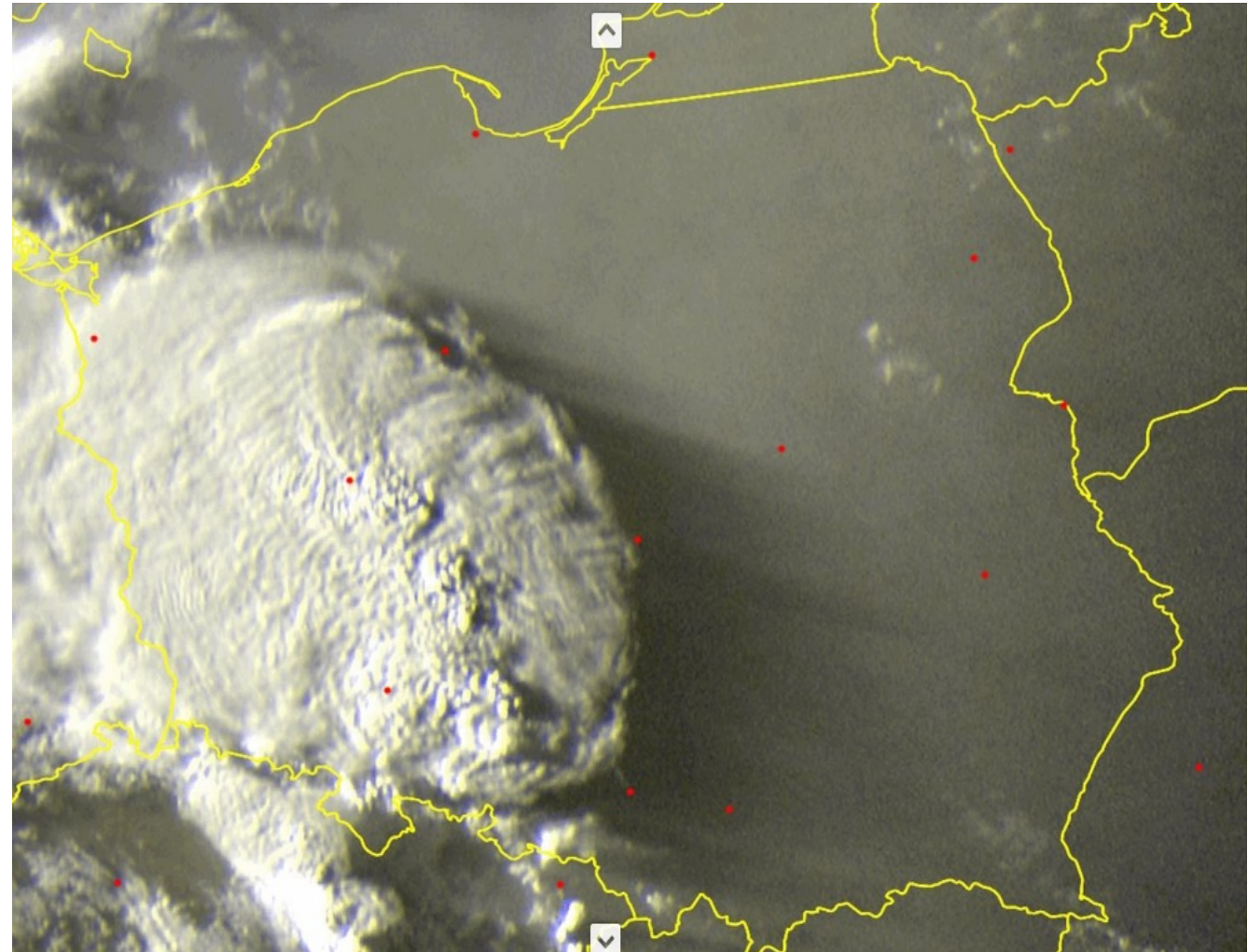
Konwekcja

- Rozwijające się kowadła chmur konwekcyjnych bardzo dobrze uwidaczniają się na zdjęciach satelitarnych. Przy bardzo silnej konwekcji rozpiętość kowadeł może przekraczać 1000 km!



Konwekcja

- 11 sierpnia 2017 roku, zjawisko derecho (linia szkwału) nad południowo-zachodnimi rejonami Polski (zdjęcie satelitarne w paśmie widzialnym).



Konwekcja

Pytanie: W wyniku jakiego procesu fizycznego, powietrze które się unosi ulega ochłodzeniu?

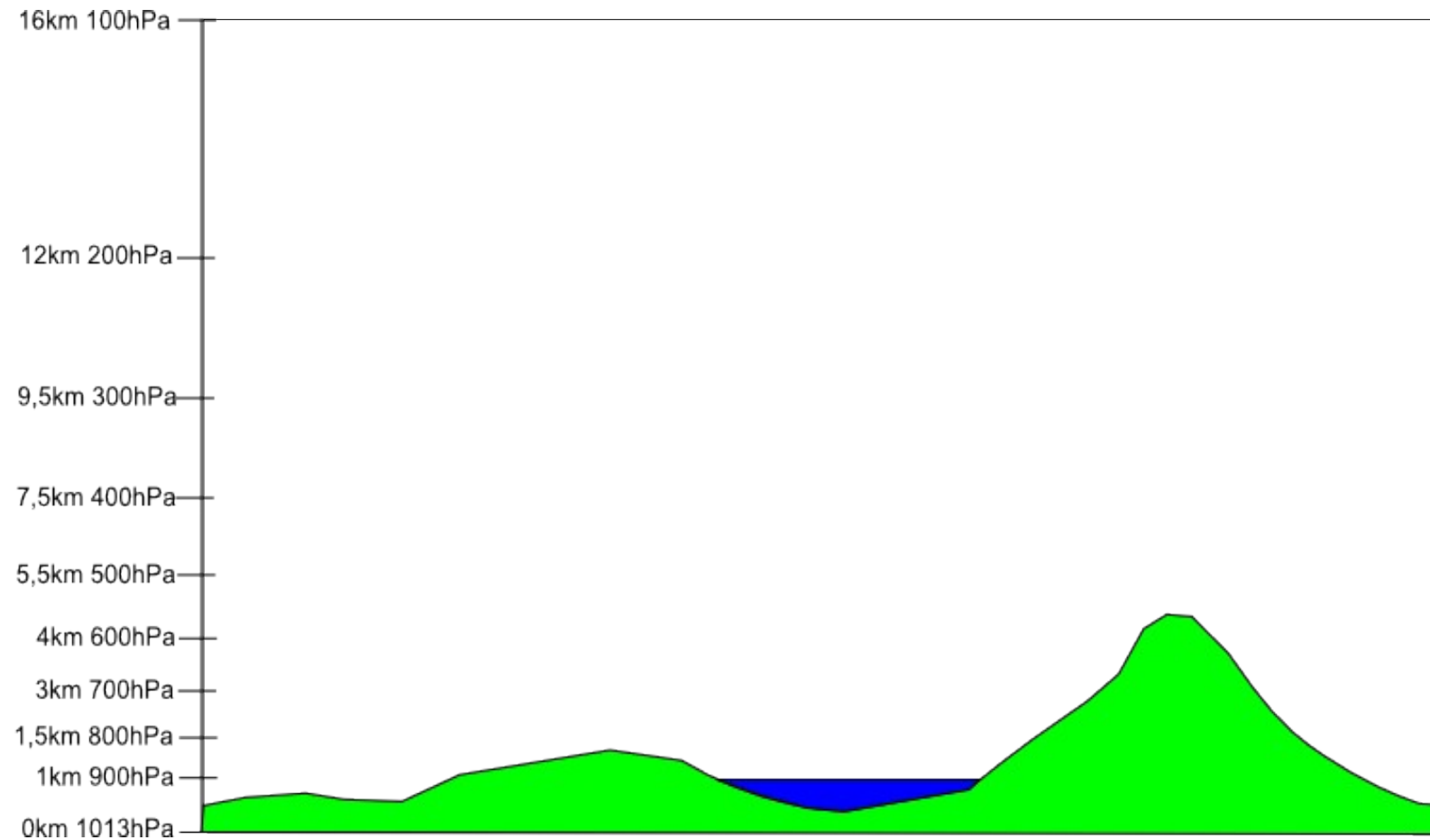
Konwekcja

Pytanie: W wyniku jakiego procesu fizycznego, powietrze które się unosi ulega ochłodzeniu?

Odpowiedz: W wyniku przemian adiabatycznych!

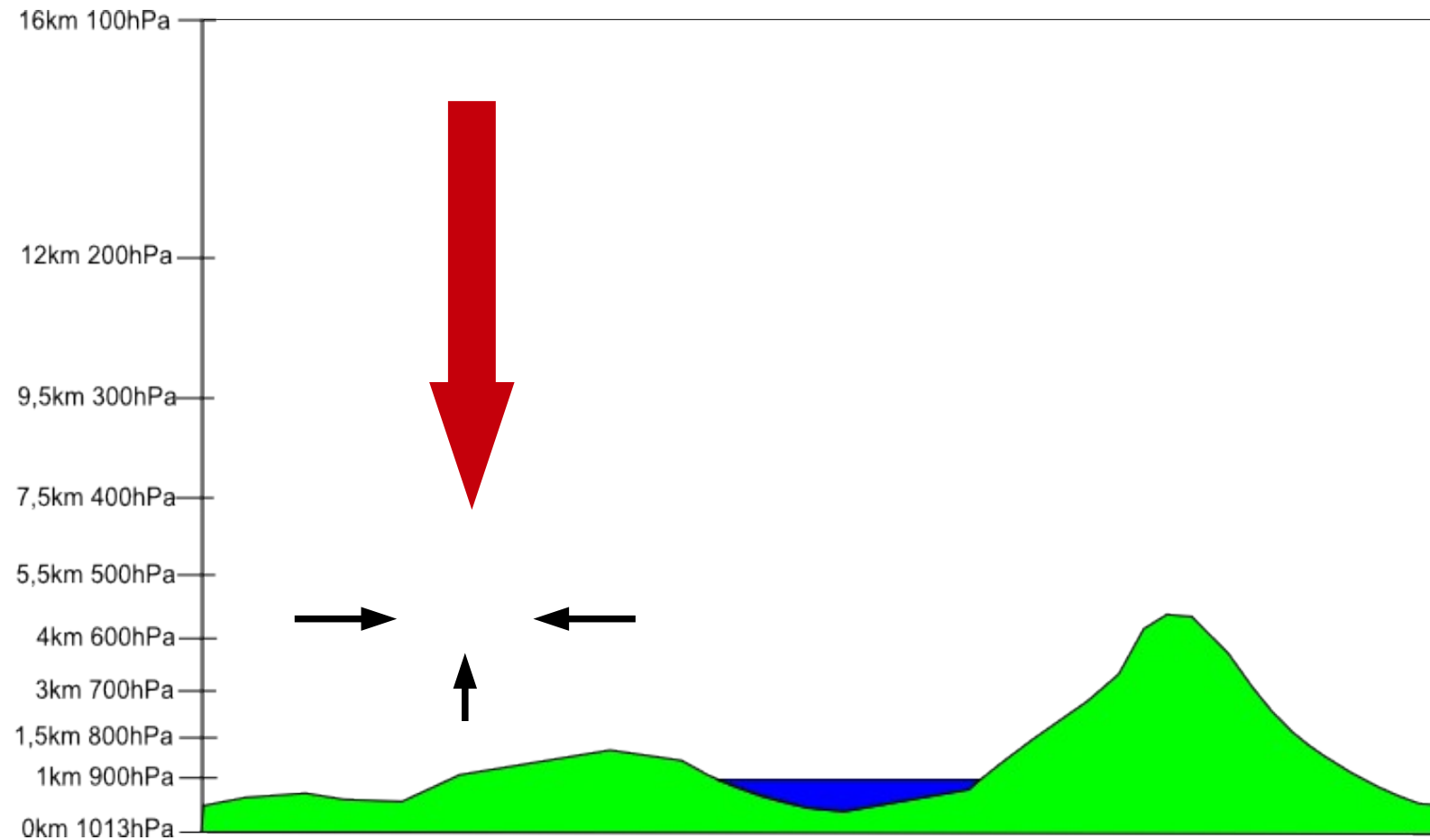
Przemiany adiabaticzne

Sprężanie lub rozprężanie powietrza związane z ruchami pionowymi powoduje zmiany temperatury.



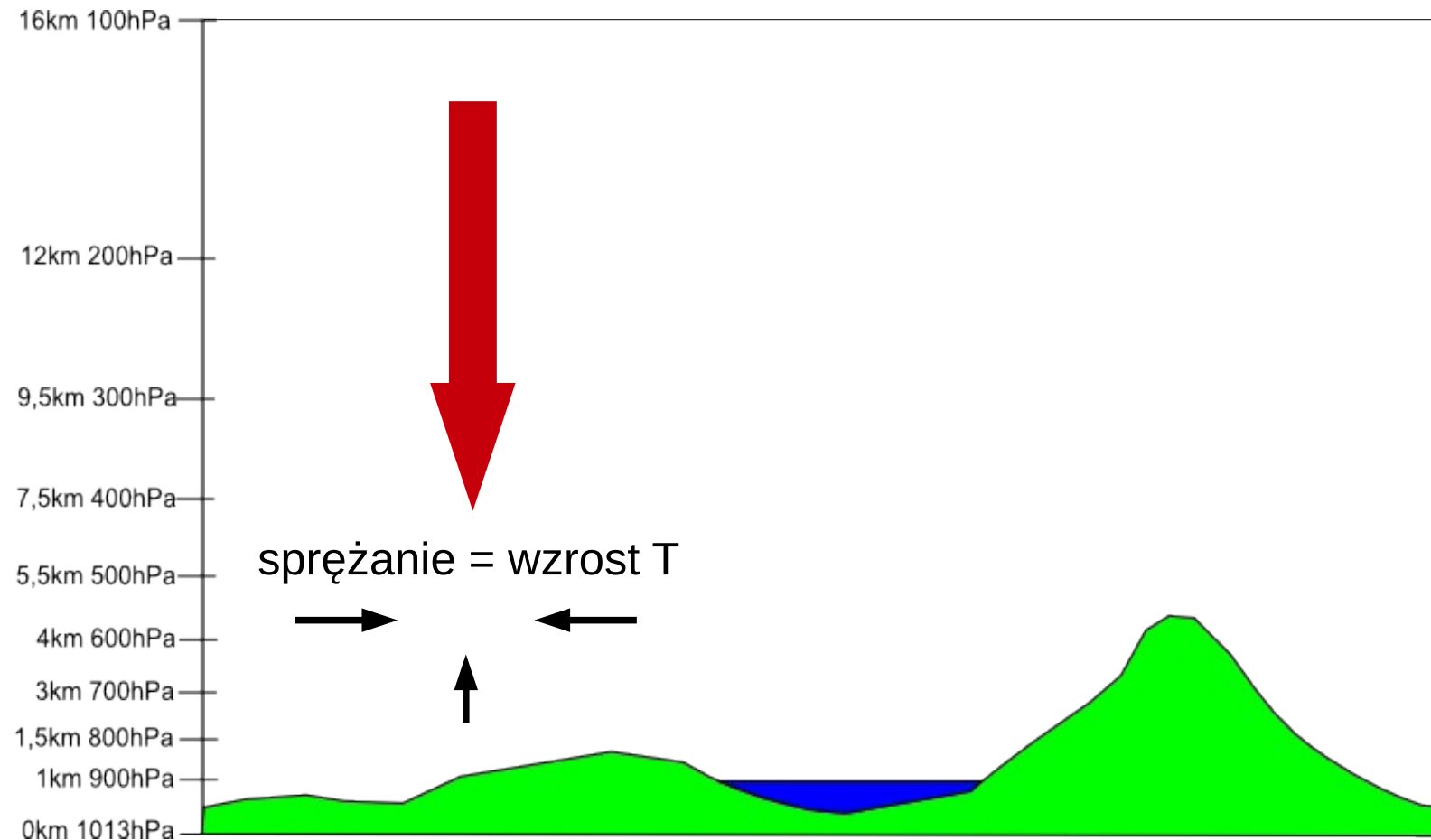
Przemiany adiabaticzne

Sprężanie lub rozprężanie powietrza związane z ruchami pionowymi powoduje zmiany temperatury.



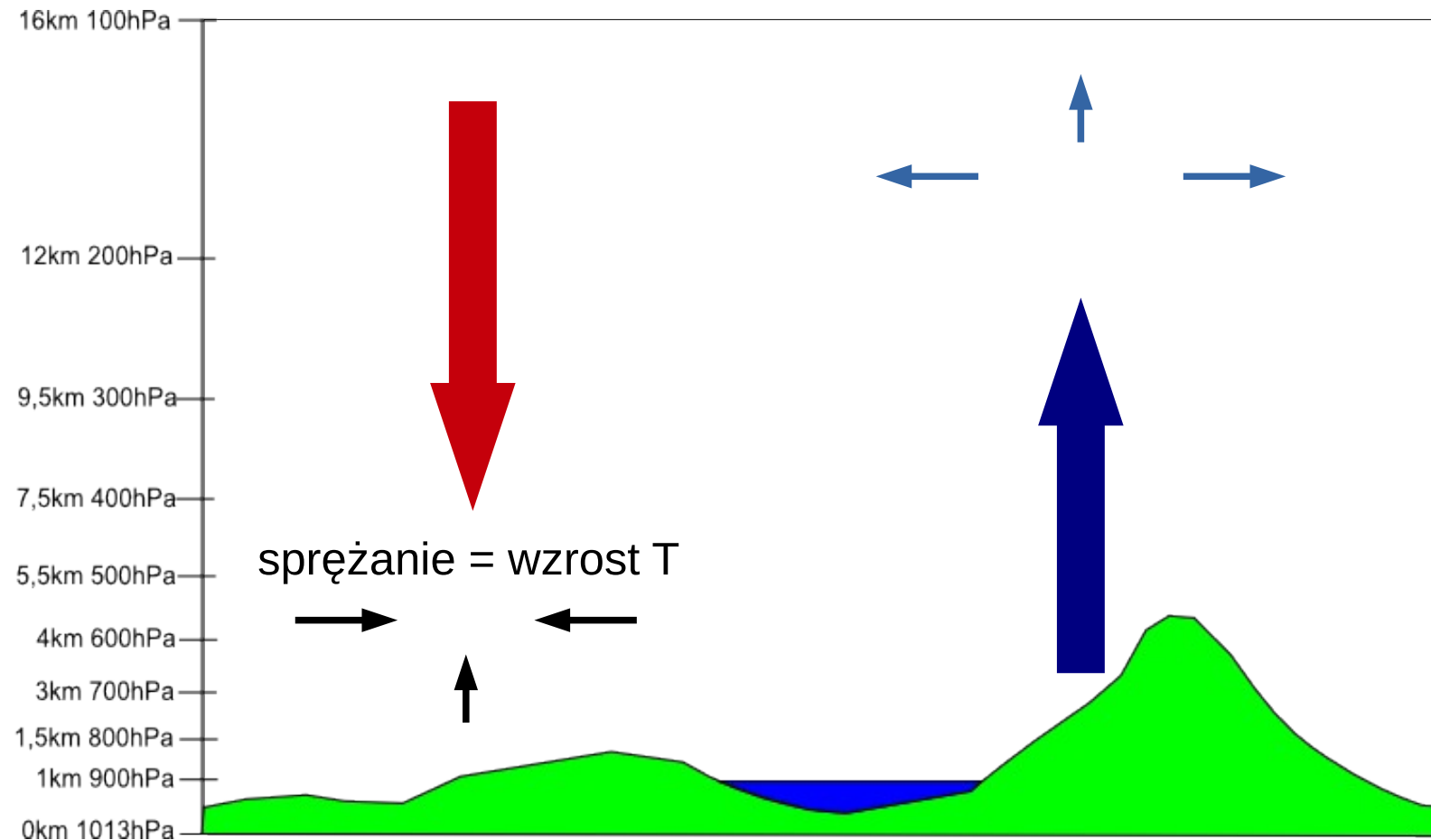
Przemiany adiabaticzne

Sprężanie lub rozprężanie powietrza związane z ruchami pionowymi powoduje zmiany temperatury.



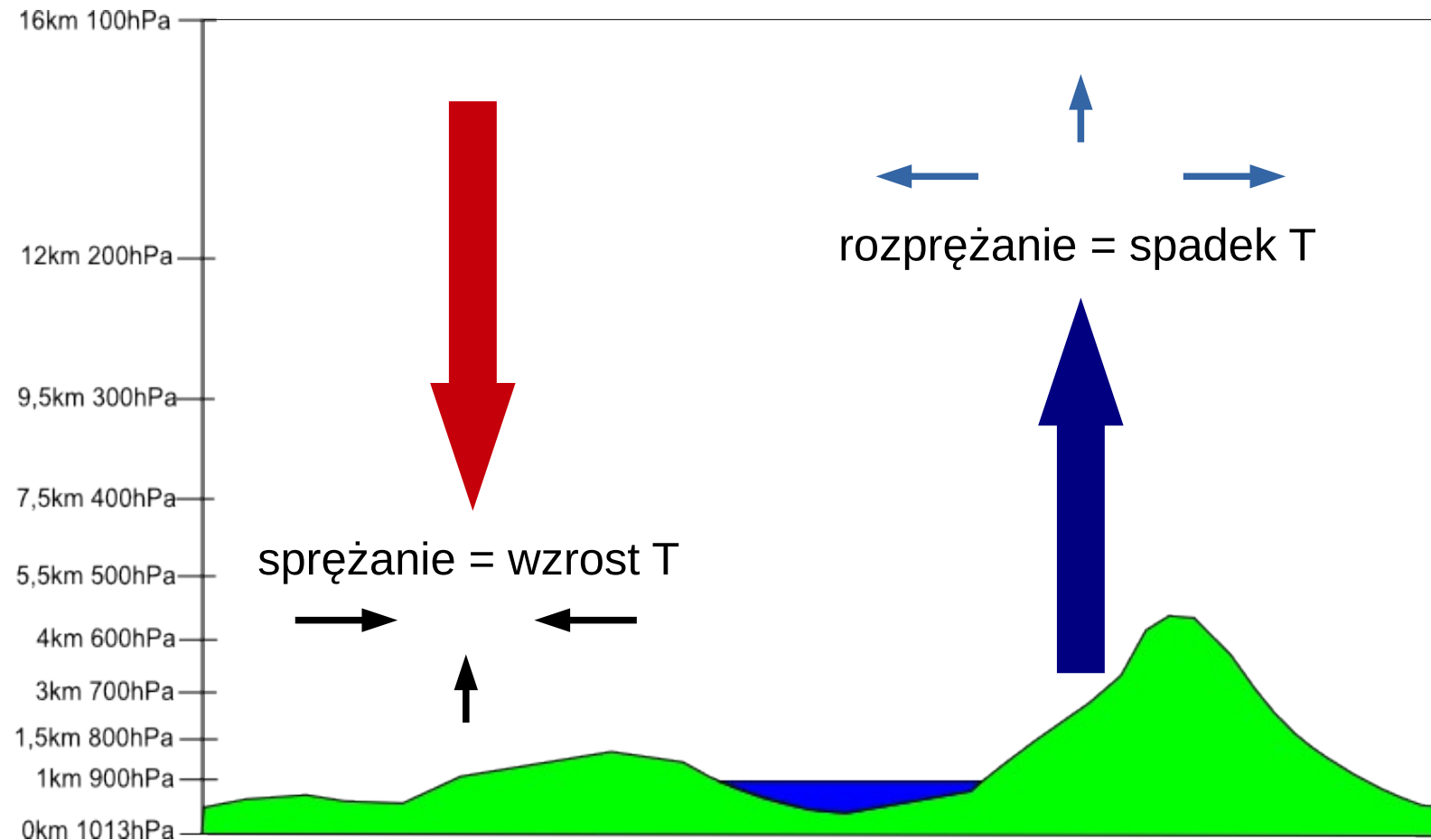
Przemiany adiabatyczne

Sprężanie lub rozprężanie powietrza związane z ruchami pionowymi powoduje zmiany temperatury.

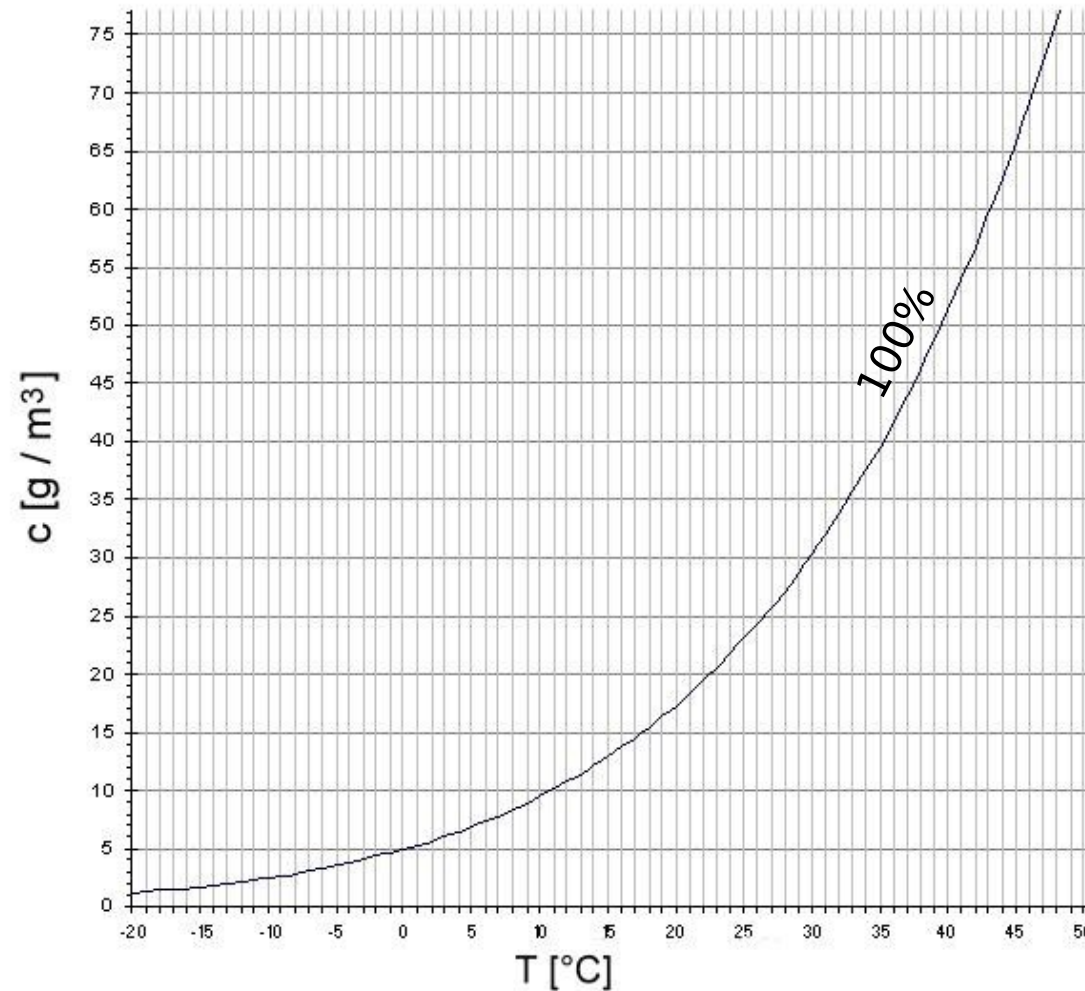


Przemiany adiabatyczne

Sprężanie lub rozprężanie powietrza związane z ruchami pionowymi powoduje zmiany temperatury.



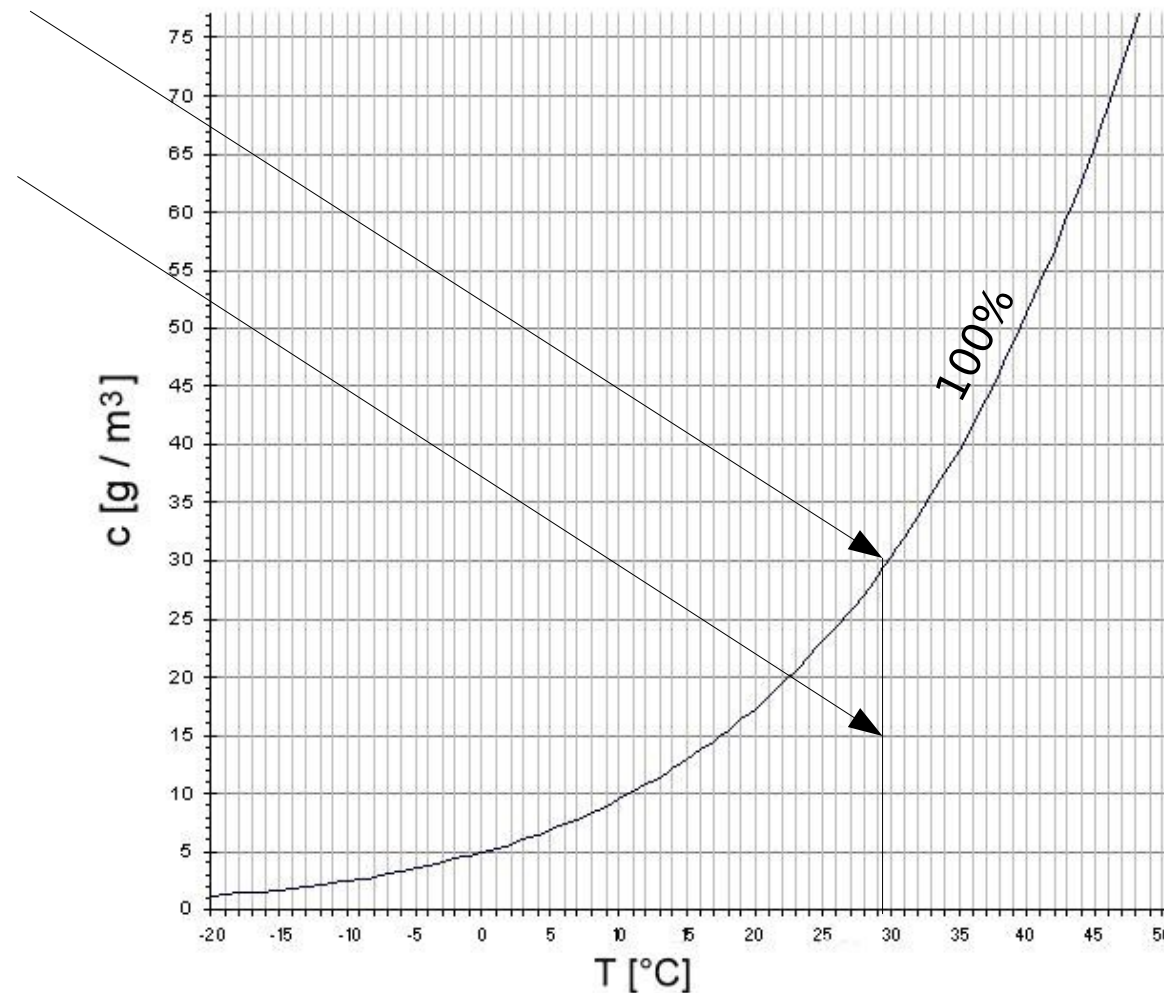
Przemiany fazowe wody



Przemiany fazowe wody

30 g/m³, 30 °C
(wilgotność 100%)

15 g/m³, 30 °C
(wilgotność 50%)



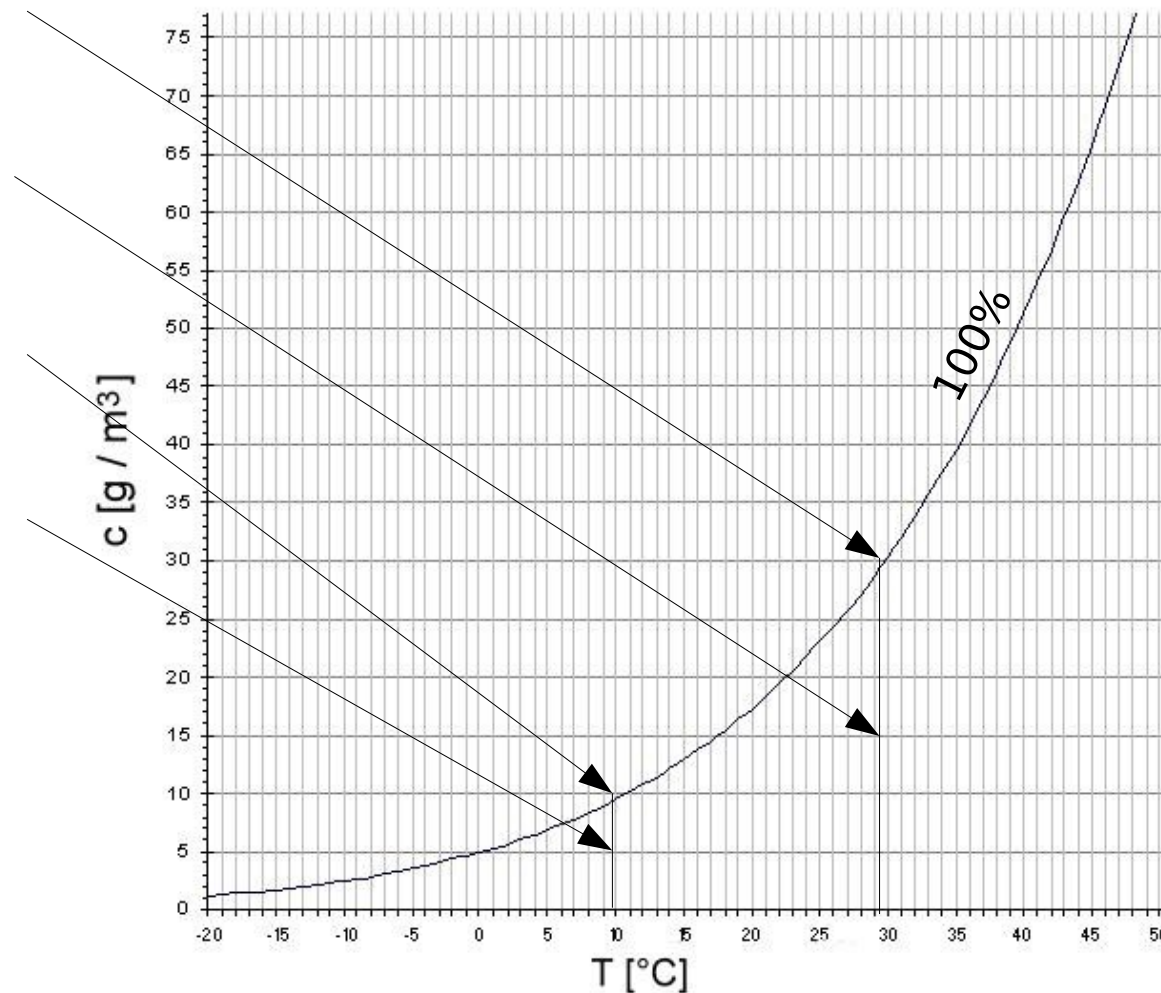
Przemiany fazowe wody

30 g/m³, 30 °C
(wilgotność 100%)

15 g/m³, 30 °C
(wilgotność 50%)

10 g/m³, 10 °C
(wilgotność 100%)

5 g/m³, 10 °C
(wilgotność 50%)



Przemiany fazowe wody

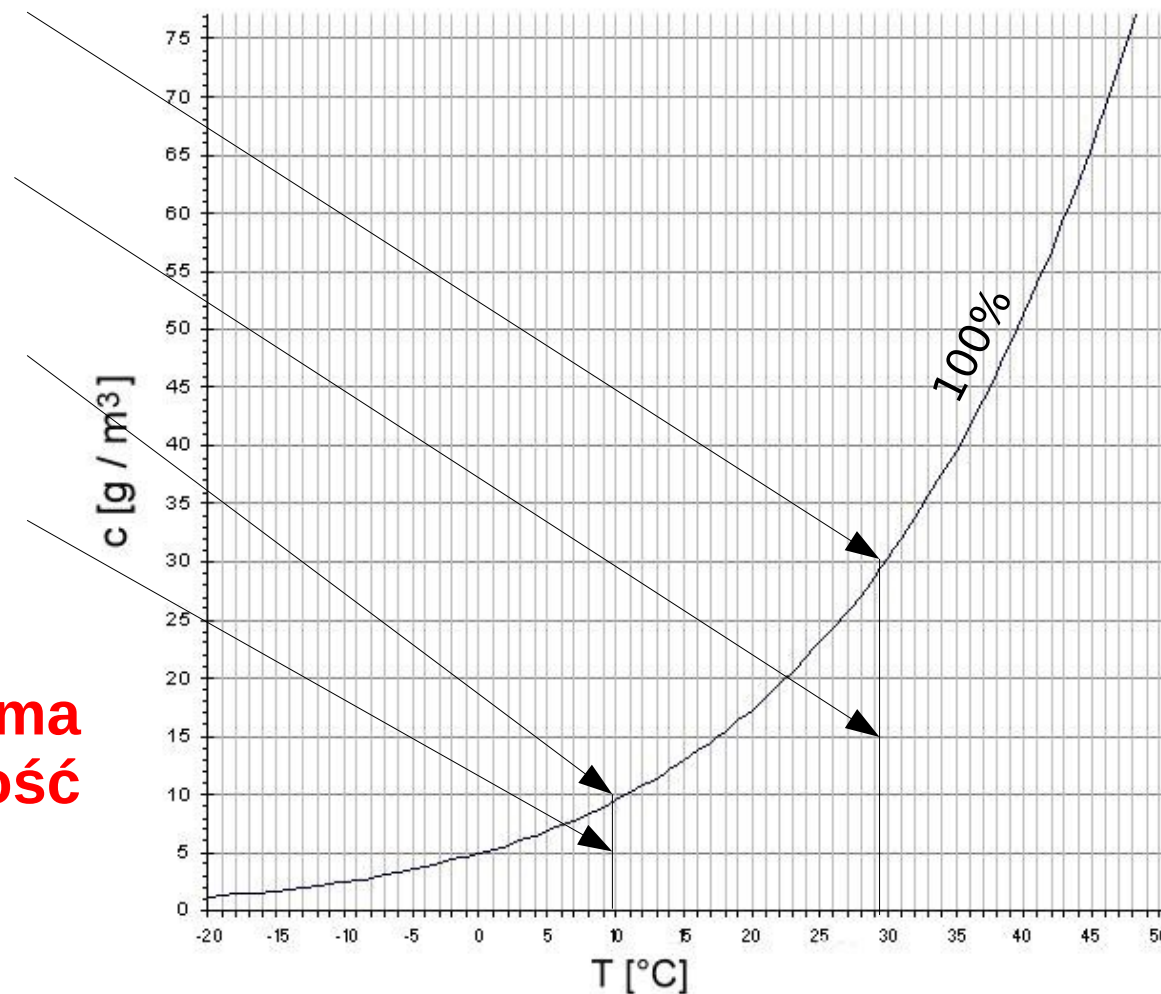
30 g/m³, 30 °C
(wilgotność 100%)

15 g/m³, 30 °C
(wilgotność 50%)

10 g/m³, 10 °C
(wilgotność 100%)

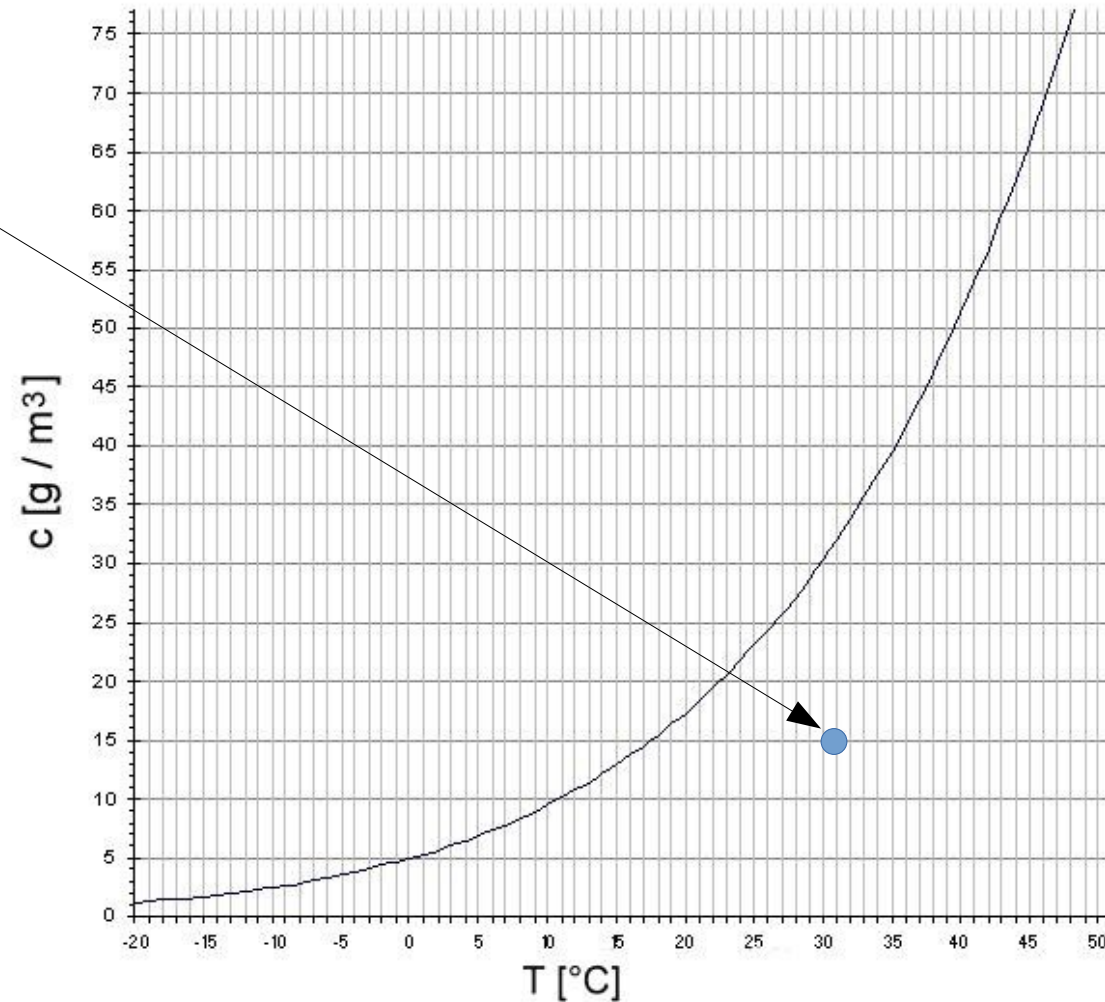
5 g/m³, 10 °C
(wilgotność 50%)

**Powietrze ciepłe ma
większą pojemność
pary wodnej!**



Przemiany fazowe wody

15 g/m³, 30 °C
(wilgotność 50%)

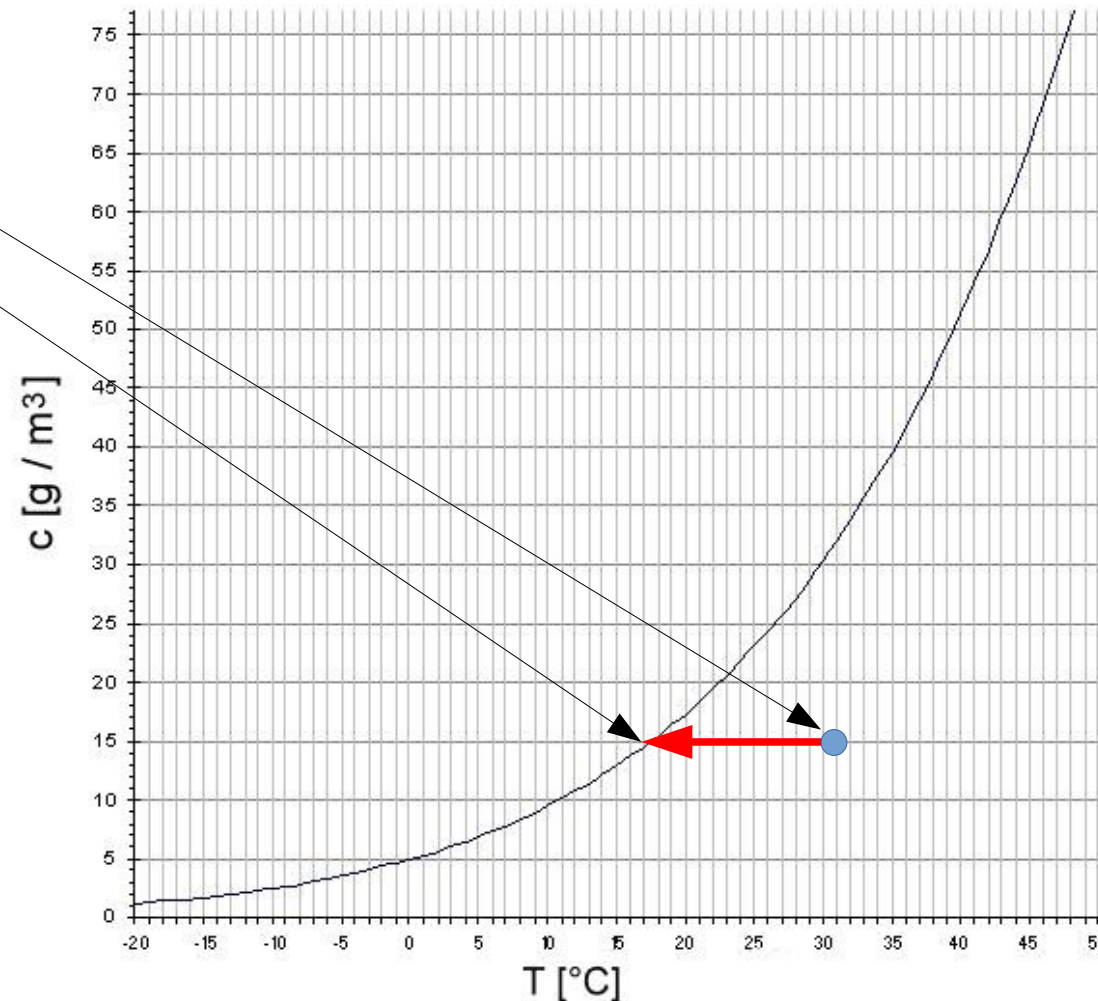


Przemiany fazowe wody

15 g/m³, 30 °C
(wilgotność 50%)

... ochładzamy do
17°C

(wilgotność bezwzględna
pozostała bez zmian ~ 15
g/m³, jednak wilgotność
względna wzrosła do
100%)



Przemiany fazowe wody

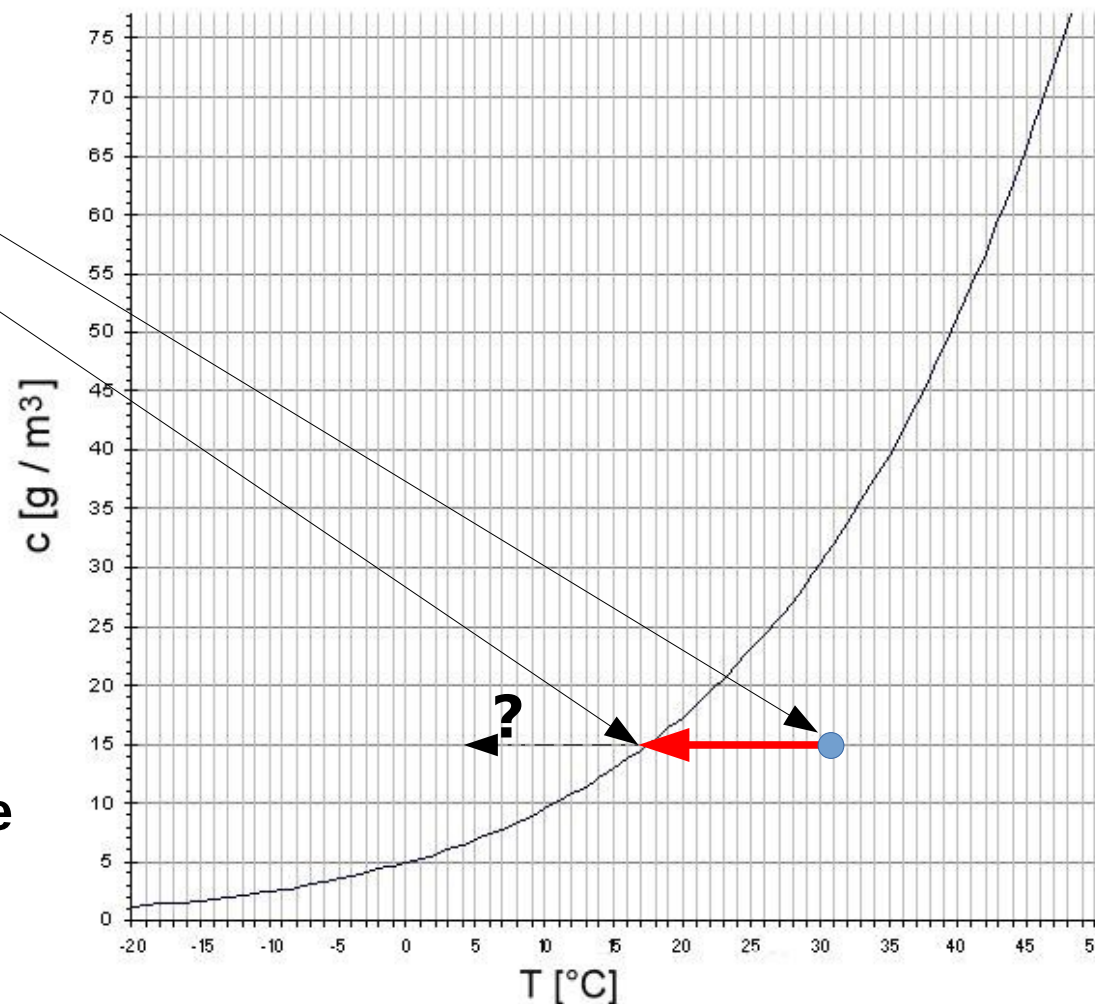
15 g/m³, 30 °C
(wilgotność 50%)

... ochładzamy do
17°C

(wilgotność bezwzględna pozostała bez zmian ~ 15 g/m³, jednak wilgotność względna wzrosła do 100%)

Co się stanie jeżeli powietrze dalej będzie się ochładzać?

Wilgotność 150%?



Przemiany fazowe wody

Dojdzie do kondensacji pary wodnej, czyli powstania chmury!

15 g/m³
(wilgotność)

... ochłodzi
17°C

(wilgotność
pozostała
g/m³, jednorazowa
względna
100%)

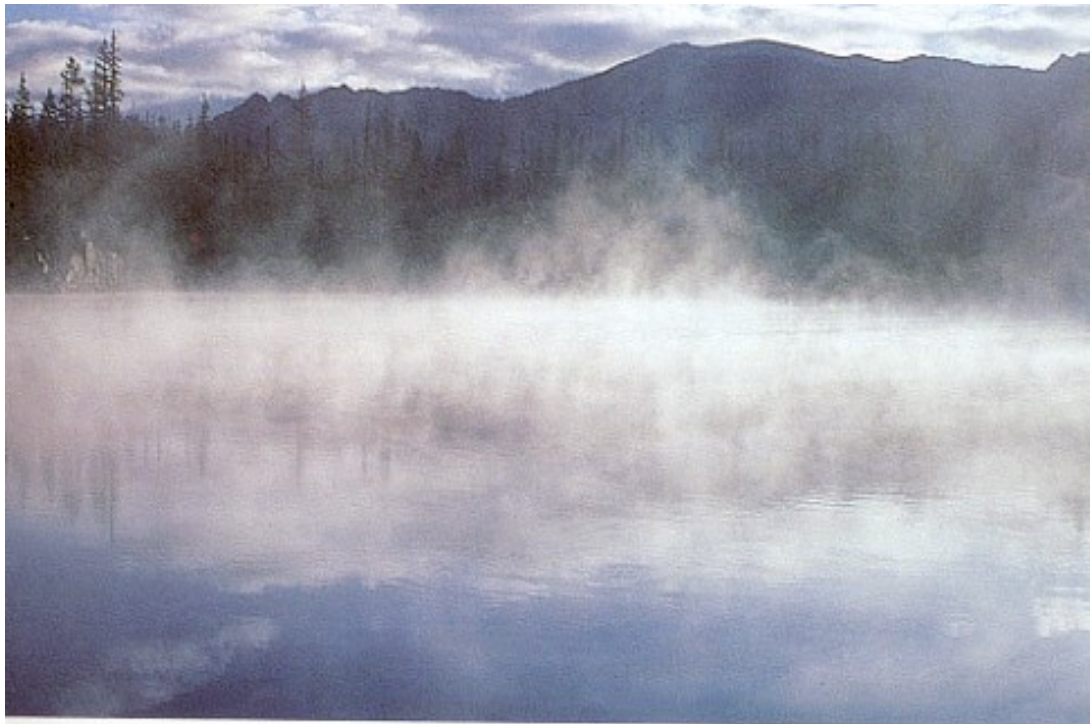
Co się stanie
dalej będzie

Wilgotność 100%



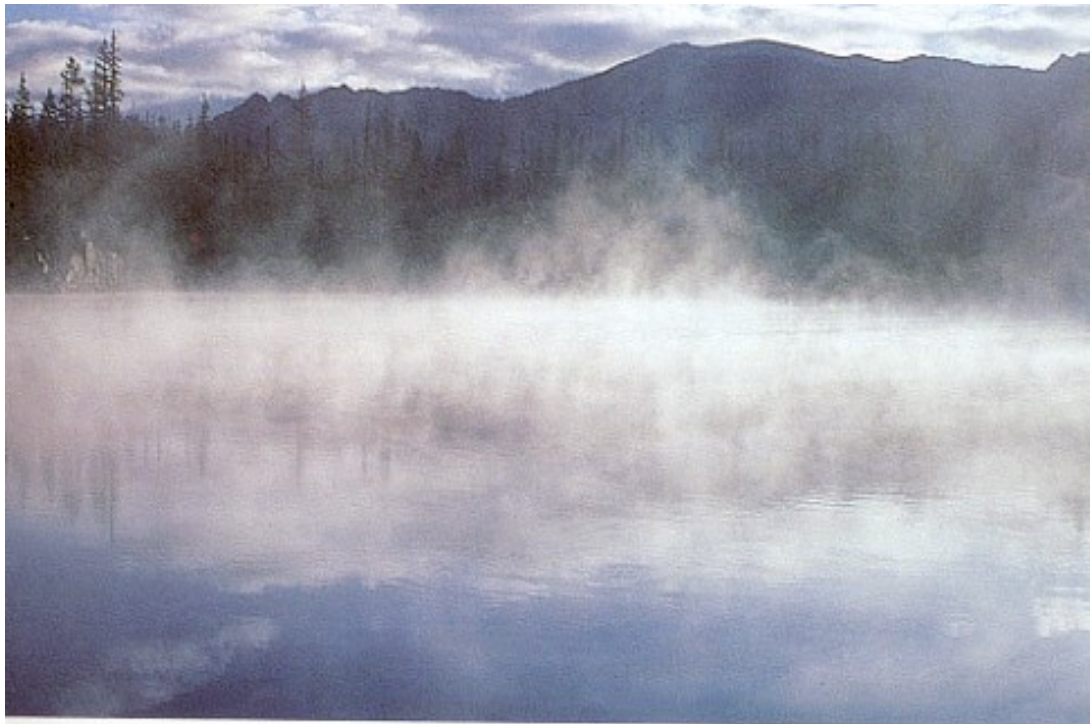
Przemiany fazowe wody

W wyniku kondensacji pary wodnej dochodzi do uwolnienia tzw. ciepła utajonego. Za każdym razem kiedy dochodzi do przejścia fazowego dochodzi do wymiany energii termicznej pomiędzy układem, a otoczeniem.



Przemiany fazowe wody

W wyniku kondensacji pary wodnej dochodzi do uwolnienia tzw. ciepła utajonego. Za każdym razem kiedy dochodzi do przejścia fazowego dochodzi do wymiany energii termicznej pomiędzy układem, a otoczeniem.



Przemiany fazowe wody

Parowanie



Kondensacja



Powietrze otaczające

Przemiany fazowe wody

Parowanie



Kondensacja



Ochładzanie



Powietrze otaczające



Przemiany fazowe wody

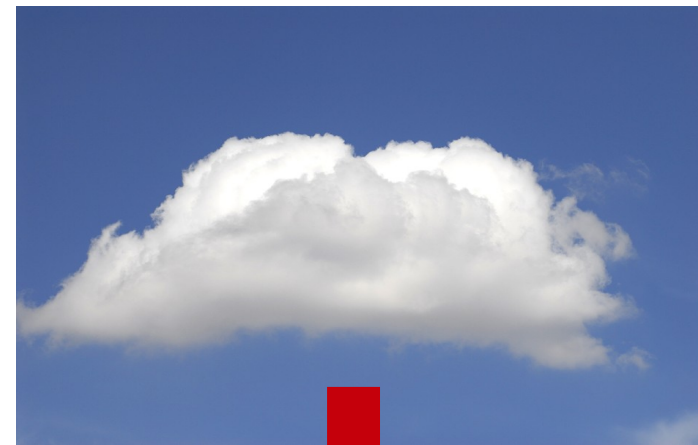
Parowanie



Ochładzanie



Kondensacja



Ocieplanie



Powietrze otaczające

Gradienty adiabatyczne

Uwzględniając omówione procesy związane z wymianą ciepła można ustalić, że powietrze zmienia swoją temperaturę o:

1 °C / 100m – w powietrzu suchym (wilgotność poniżej 100%)

0,6 °C / 100m – w powietrzu wilgotnym (wilgotność 100%)

Gradienty adiabatyczne

Uwzględniając omówione procesy związane z wymianą ciepła można ustalić, że powietrze zmienia swoją temperaturę o:

1 °C / 100m – w powietrzu suchym (wilgotność poniżej 100%)

GRADIENT SUCHOADIABATYCZNY

0,6 °C / 100m – w powietrzu wilgotnym (wilgotność 100%)

Gradienty adiabatyczne

Uwzględniając omówione procesy związane z wymianą ciepła można ustalić, że powietrze zmienia swoją temperaturę o:

1 °C / 100m – w powietrzu suchym (wilgotność poniżej 100%)

GRADIENT SUCHOADIABATYCZNY

0,6 °C / 100m – w powietrzu wilgotnym (wilgotność 100%)

GRADIENT WILGOTNOADIABATYCZNY

Gradienty adiabatyczne

Uwzględniając omówione procesy związane z wymianą ciepła można ustalić, że powietrze zmienia swoją temperaturę o:

1 °C / 100m – w powietrzu suchym (wilgotność poniżej 100%)

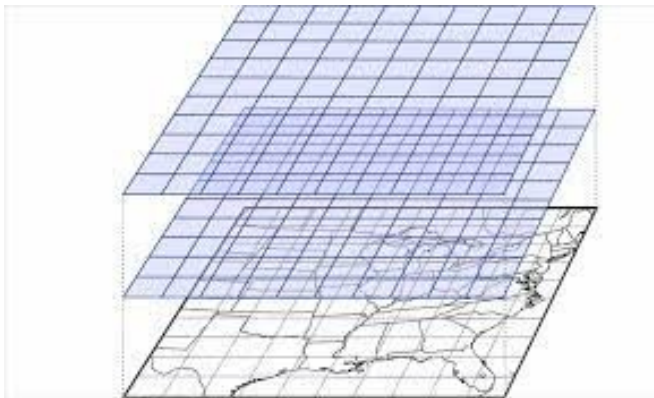
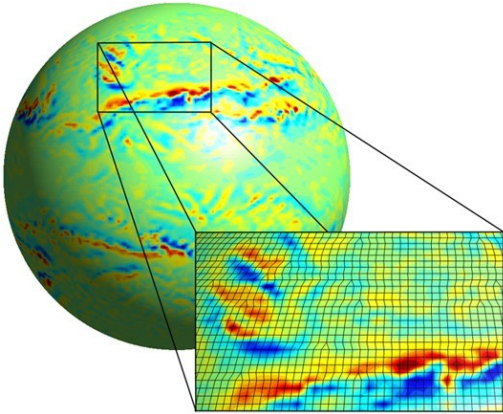
GRADIENT SUCHOADIABATYCZNY

0,6 °C / 100m – w powietrzu wilgotnym (wilgotność 100%)

GRADIENT WILGOTNOADIABATYCZNY

Fundamentalna zasada używana w prognozowaniu i badaniu burz!

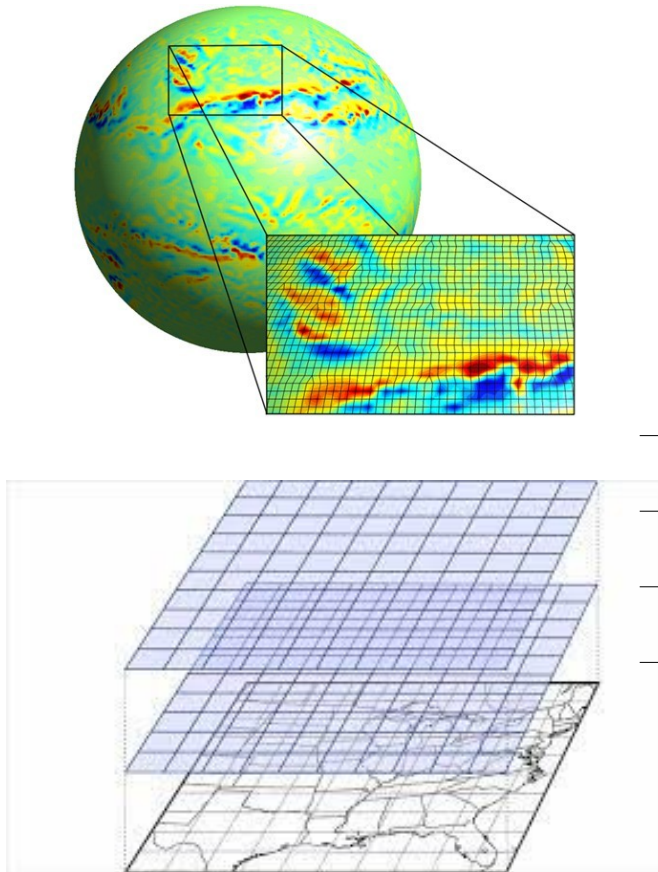
Numeryczne modele pogody



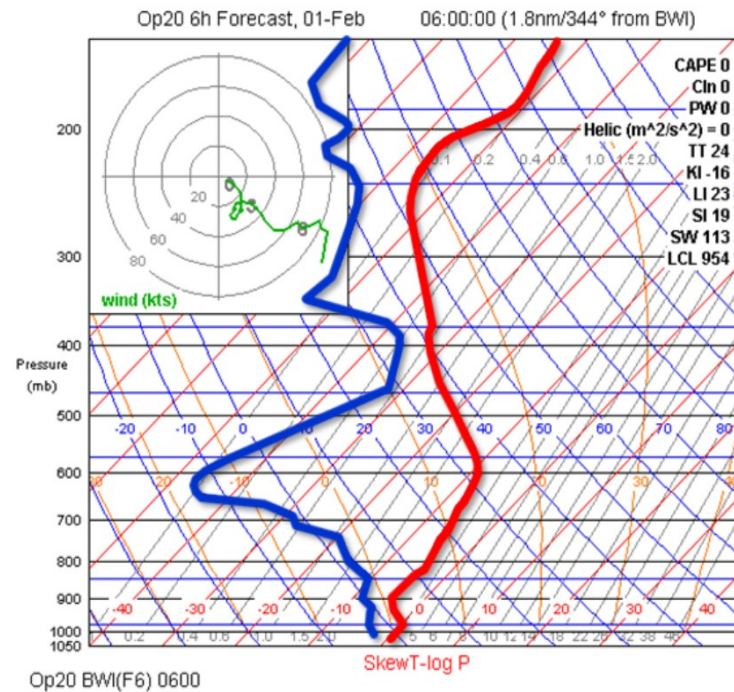
Pomiary radiosondażowe



Numeryczne modele pogody



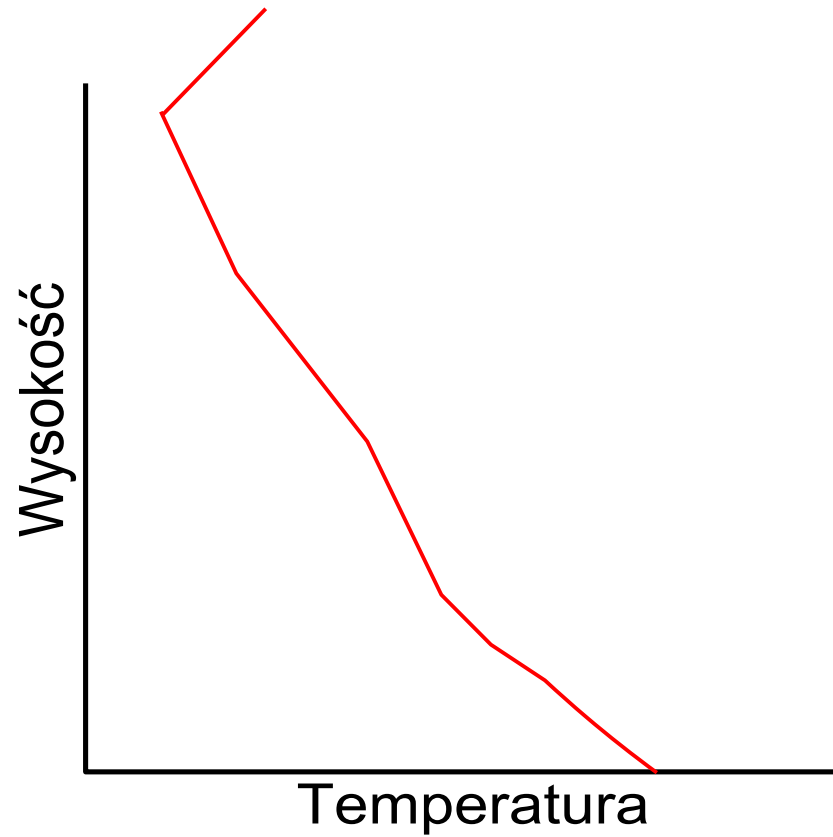
Pionowe profile atmosfery



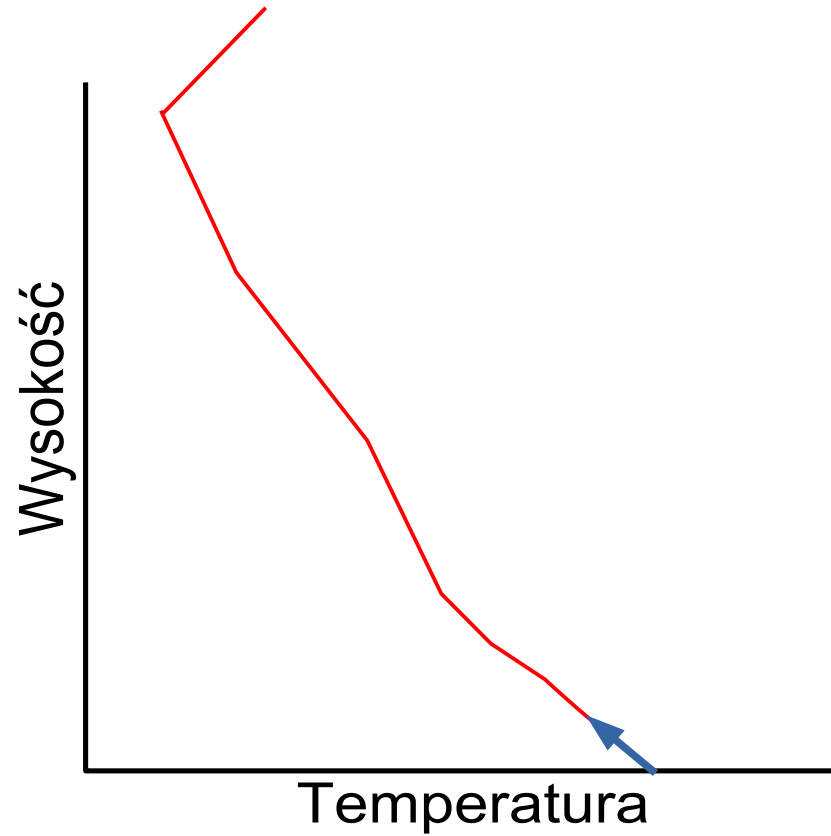
Pomiary radiosondażowe



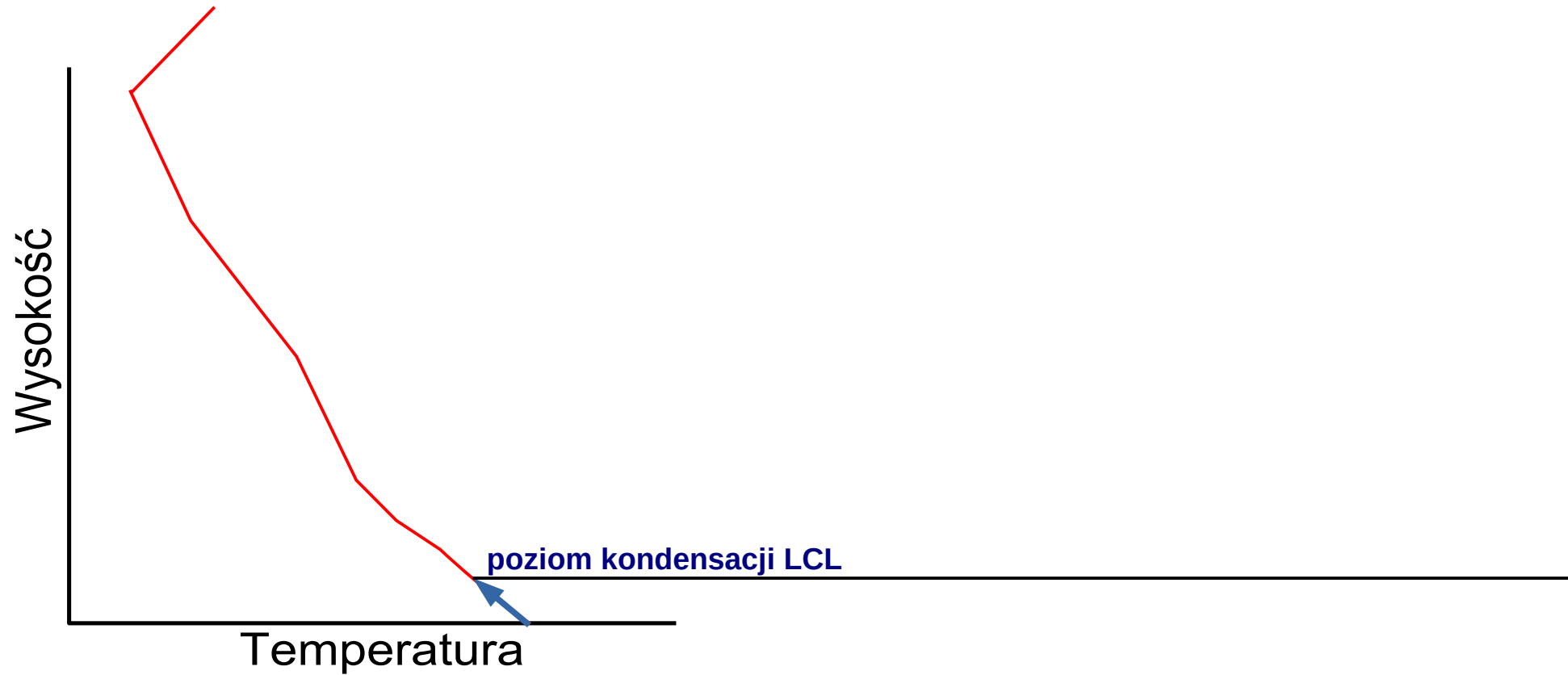
Gradienty adiabaticzne



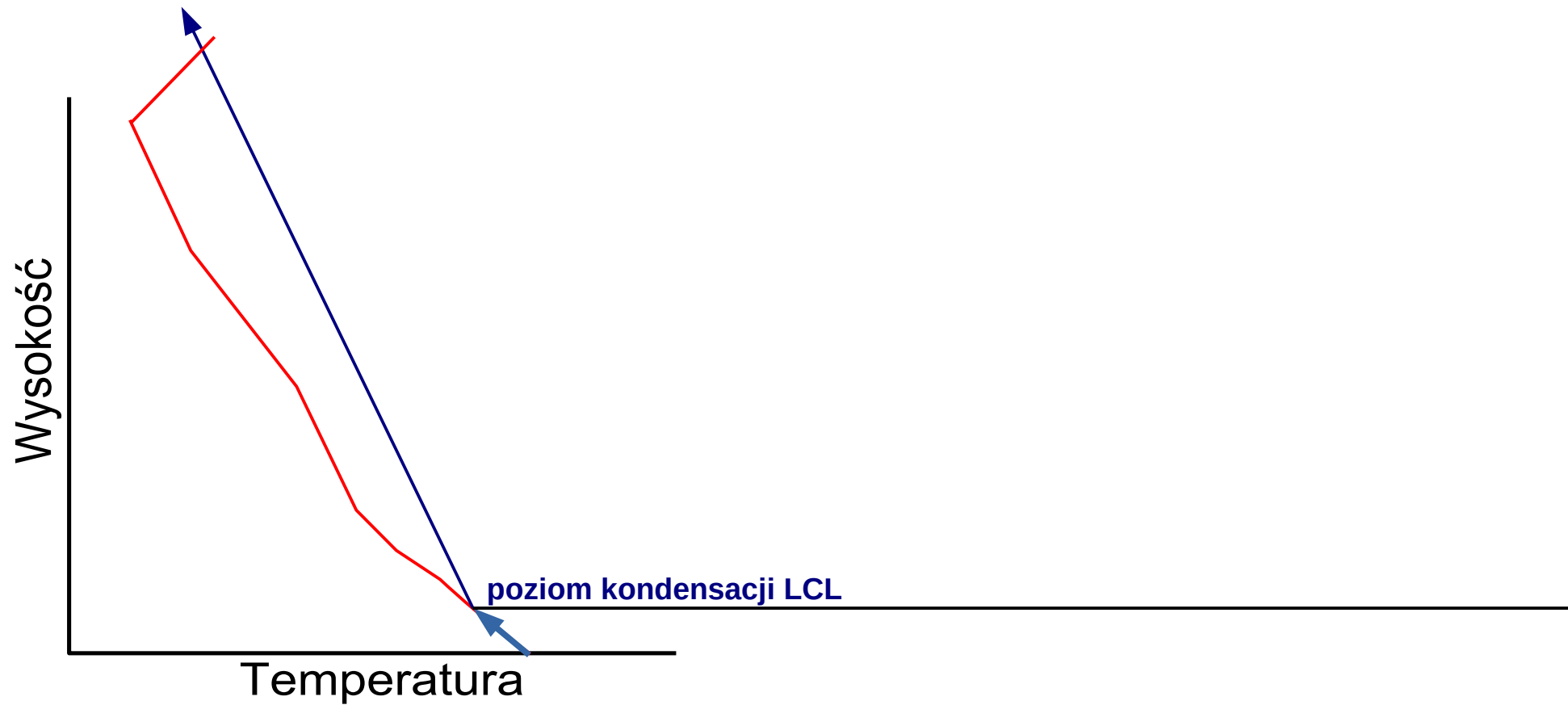
Gradienty adiabaticzne



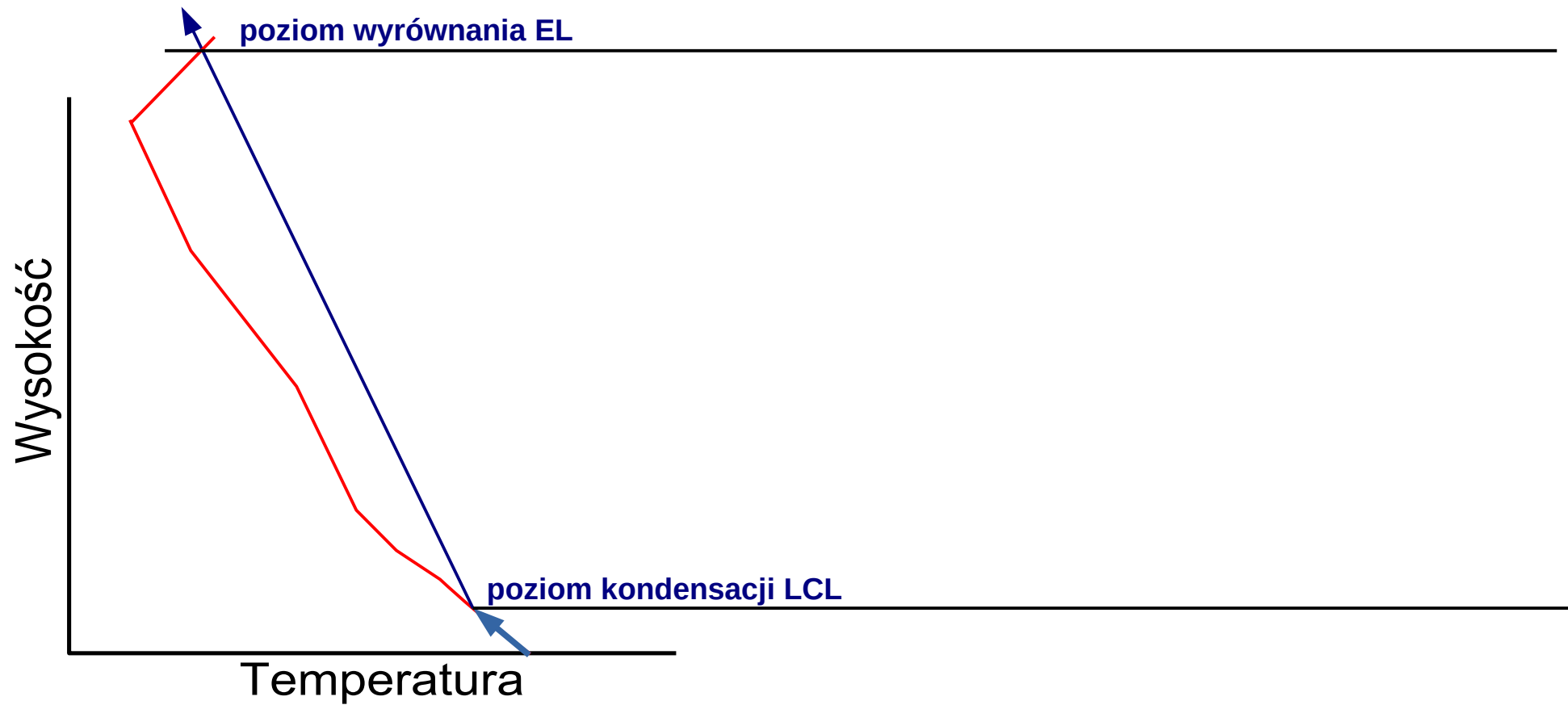
Gradienty adiabaticzne



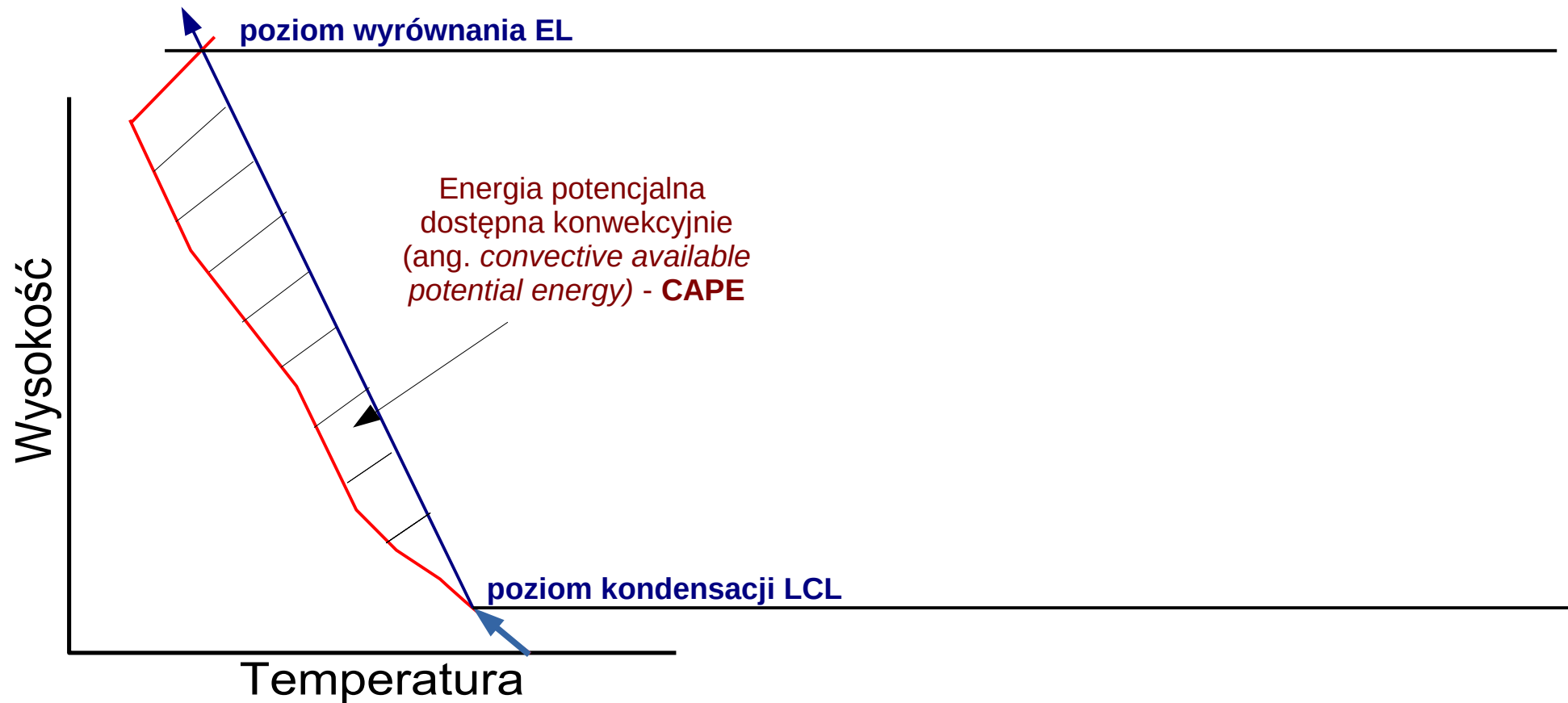
Gradienty adiabatyczne



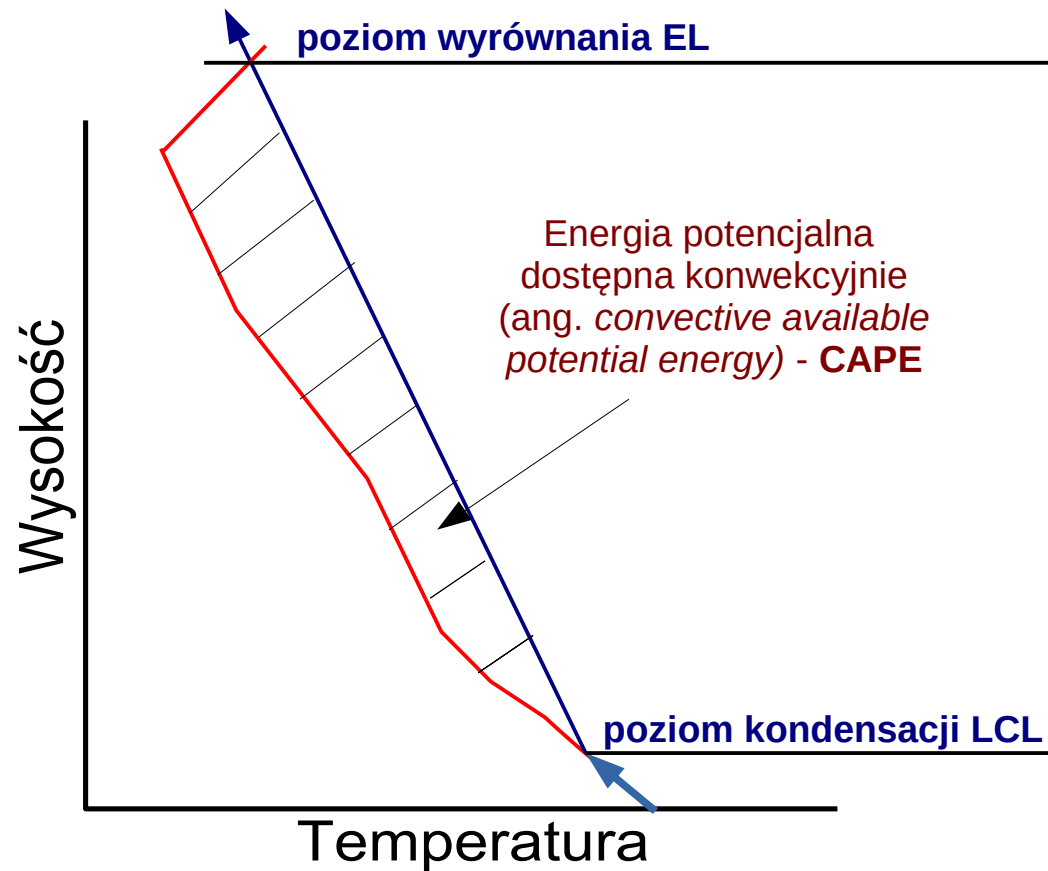
Gradienty adiabaticzne



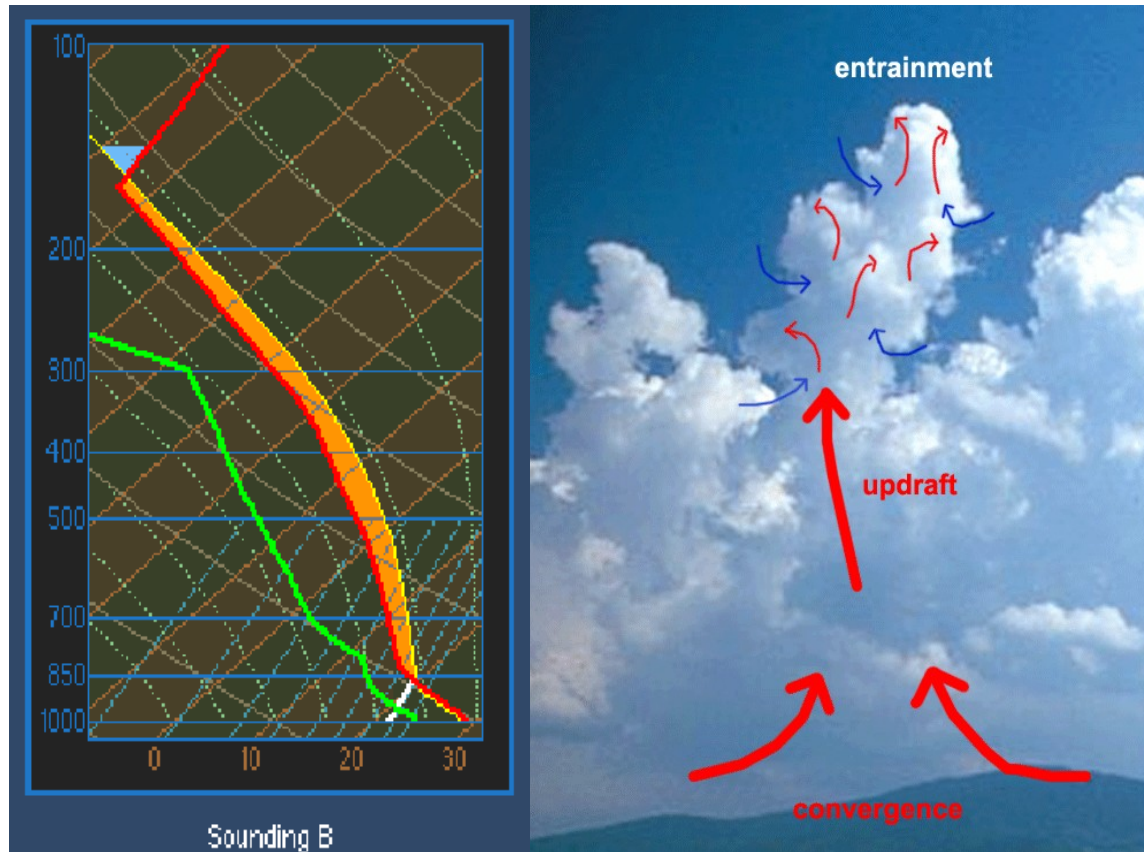
Gradienty adiabaticzne



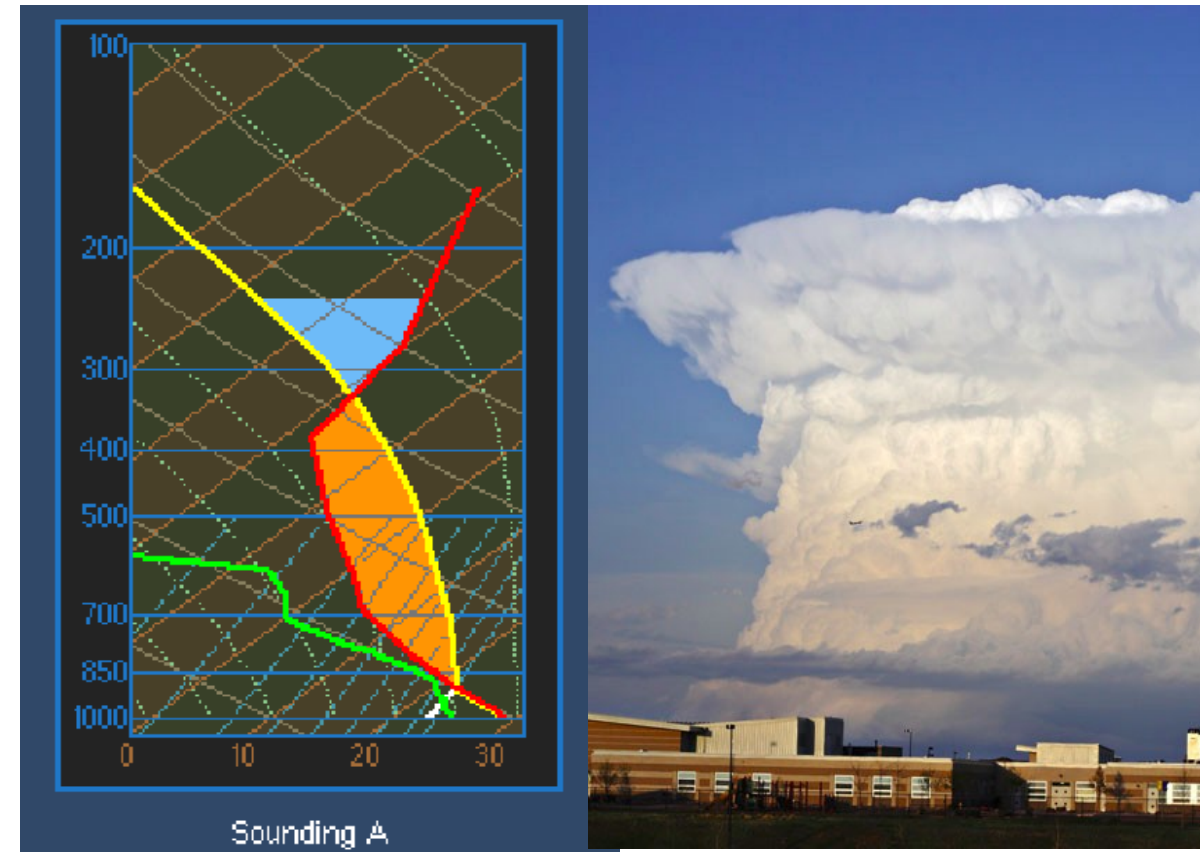
Gradienty adiabaticzne



„Chudy” CAPE

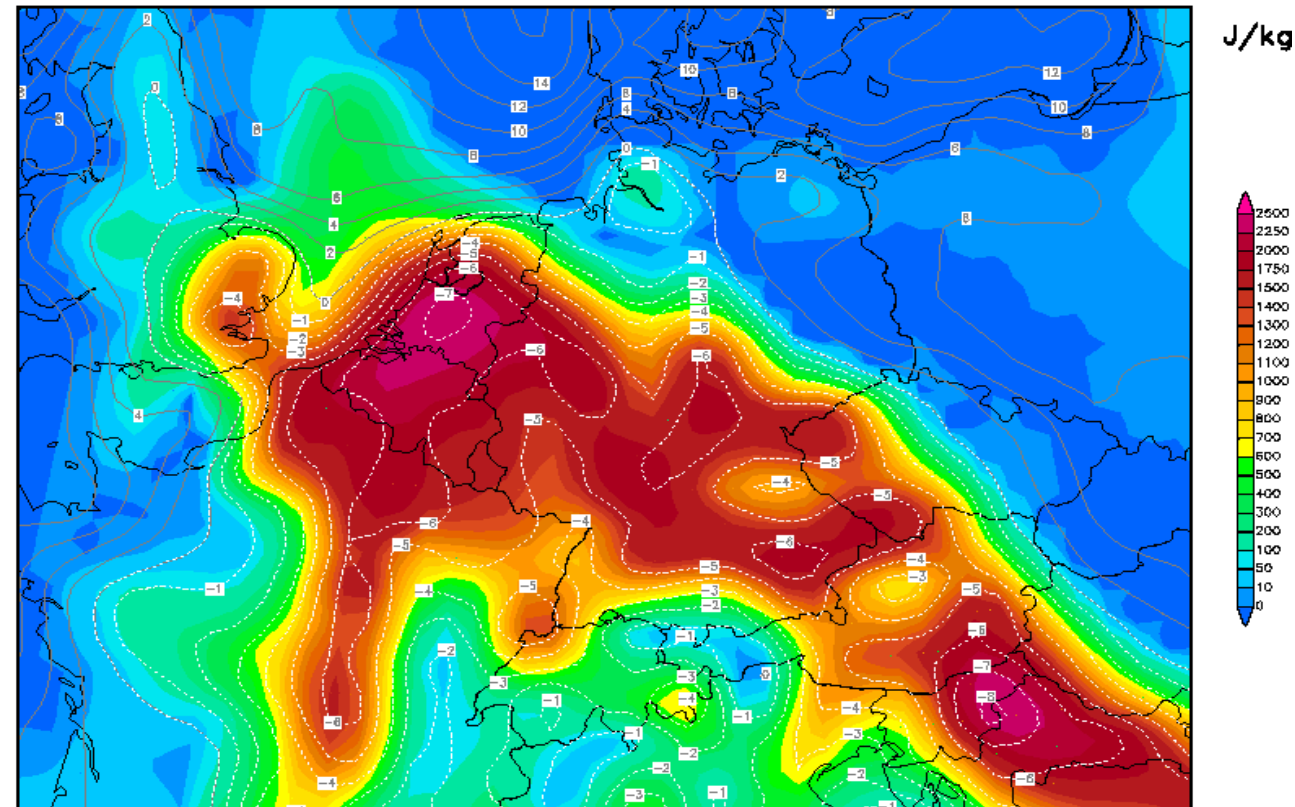


„Gruby” CAPE



Przykład prognozy CAPE w numerycznym modelu pogody

Init : Fri,22MAY2009 18Z Valid: Mon,25MAY2009 15Z
CAPE (J/kg) und Lifted Index (°C)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Ekstremalne zjawiska konwekcyjne



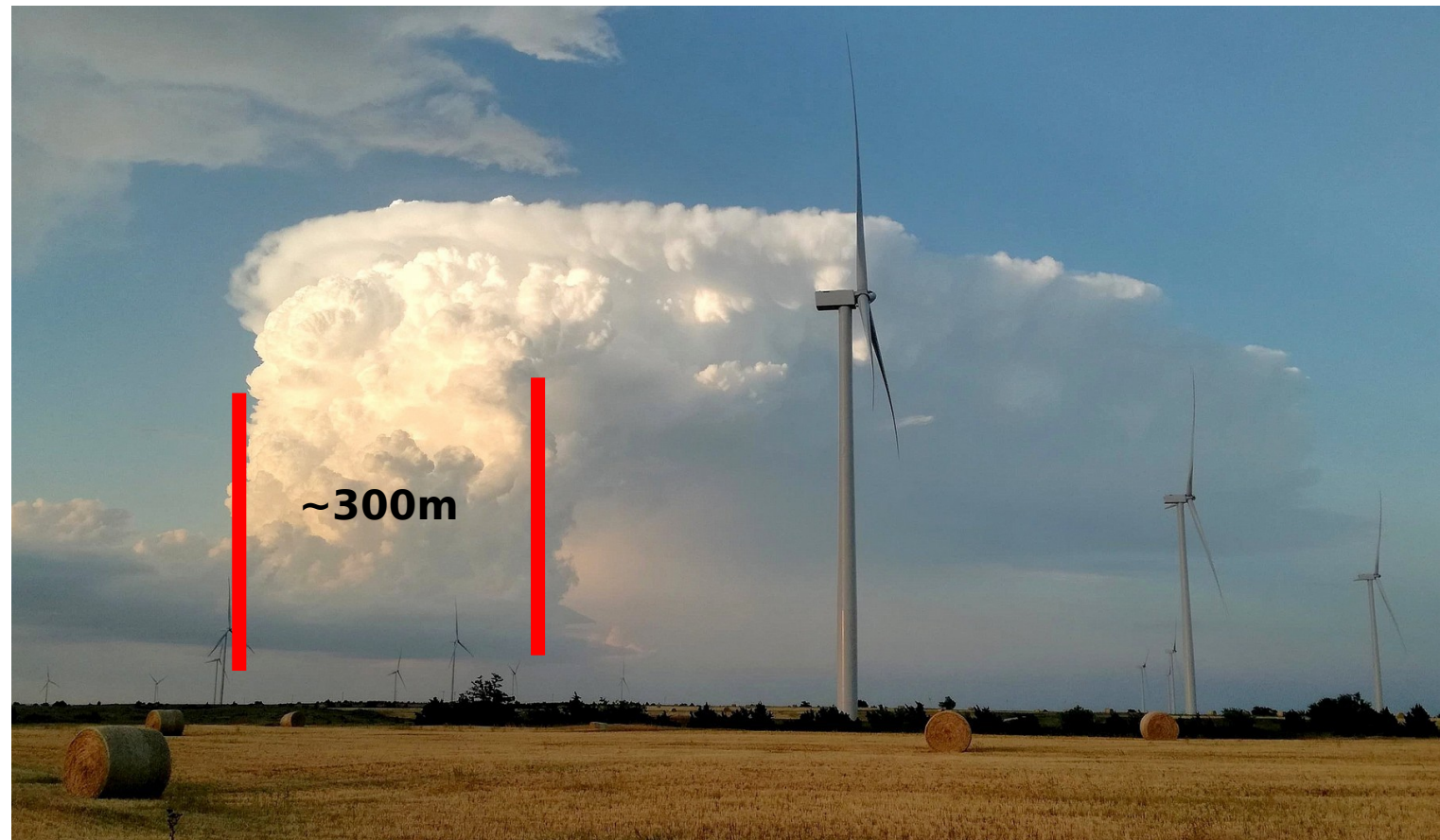
Ekstremalne zjawiska konwekcyjne

- Opady gradu
- Ulewne opady deszczu
- Silne porywy wiatru
- Trąby powietrzne
- Wyładowania atmosferyczne



Ekstremalne zjawiska konwekcyjne

- Opady gradu
- Ulewne opady deszczu
- Silne porywy wiatru
- Trąby powietrzne
- Wyładowania atmosferyczne



Ekstremalne zjawiska konwekcyjne

Pytanie: Jaki czynnik decyduje o potencjale chmur burzowych do generowania zjawisk ekstremalnych?

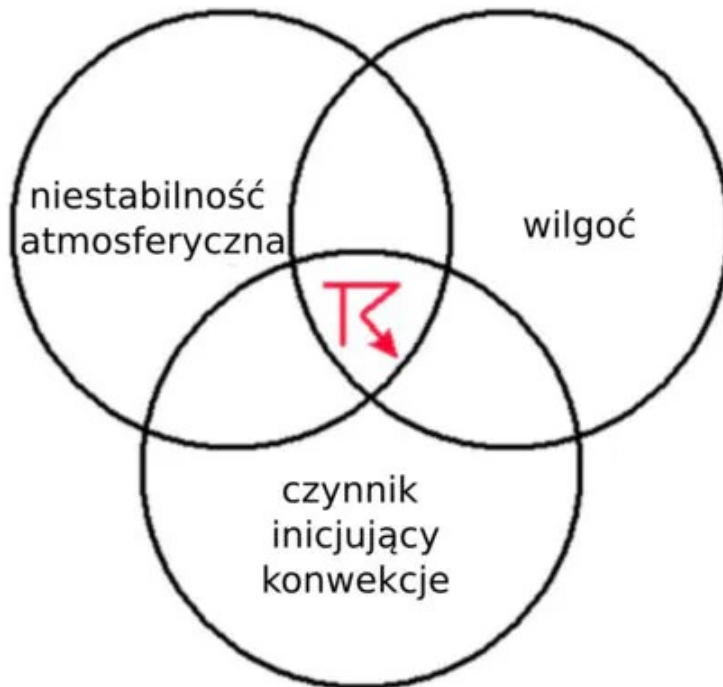
Ekstremalne zjawiska konwekcyjne

Pytanie: Jaki czynnik decyduje o potencjale chmur burzowych do generowania zjawisk ekstremalnych?

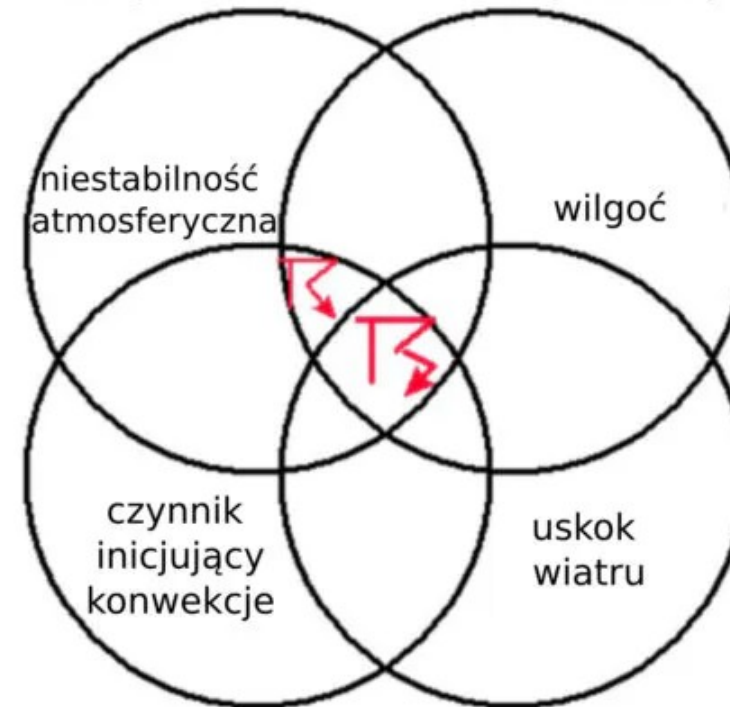
Odpowiedz: Uskok wiatru!

Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy



Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście zjawisk konwekcyjnych stosuje się tzw. metodę składnikową (ang. *ingredient-based*).

1. Wilgoć



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście zjawisk konwekcyjnych stosuje się tzw. metodę składnikową (ang. *ingredient-based*).

2. Niestabilność atmosferyczna

1. Wilgoć



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście zjawisk konwekcyjnych stosuje się tzw. metodę składnikową (ang. *ingredient-based*).

**2. Niestabilność
atmosferyczna**

1. Wilgoć

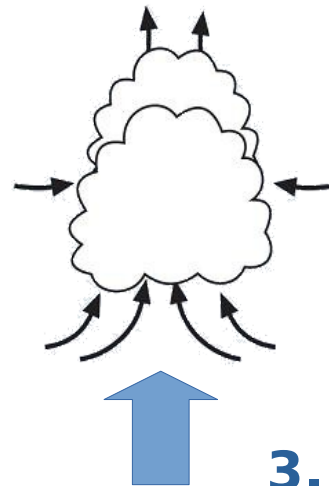


3. Czynniki inicjujące konwekcje

Uproszczony model powstawania burz

W kontekście zjawisk konwekcyjnych stosuje się tzw. metodę składnikową (ang. *ingredient-based*).

**2. Niestabilność
atmosferyczna**



1. Wilgoć

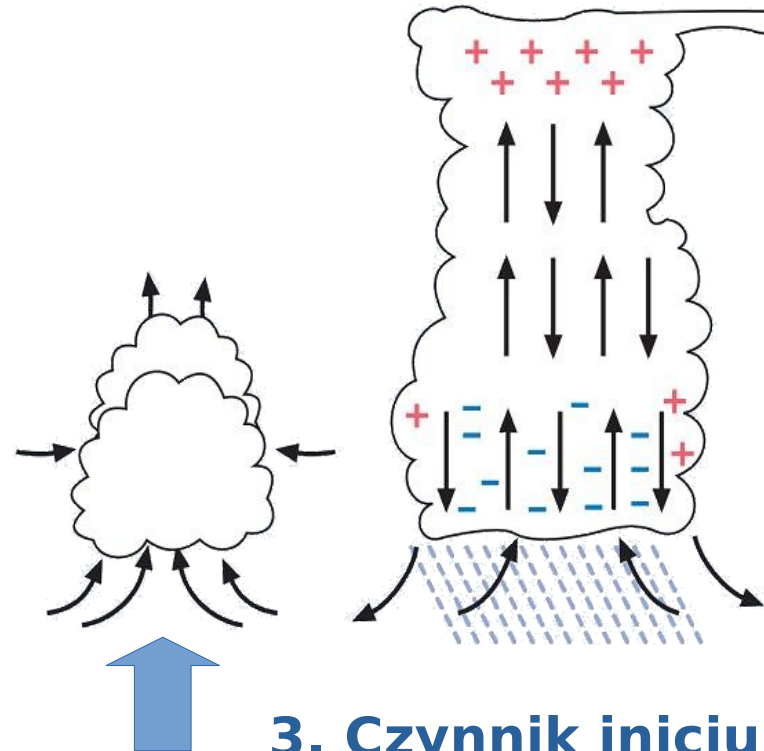
3. Czynniki inicjujące konwekcje

Uproszczony model powstawania burz

W kontekście zjawisk konwekcyjnych stosuje się tzw. metodę składnikową (ang. *ingredient-based*).

**2. Niestabilność
atmosferyczna**

1. Wilgoć



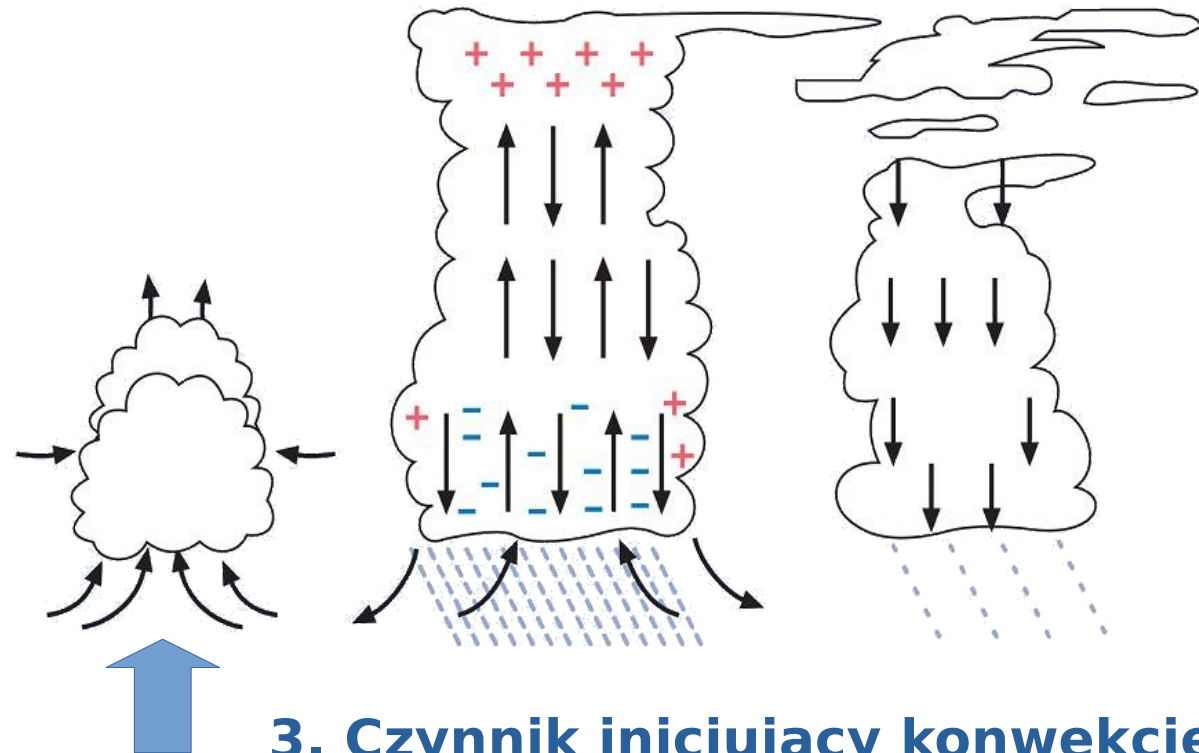
3. Czynn timer inicjujący konwekcję

Uproszczony model powstawania burz

W kontekście zjawisk konwekcyjnych stosuje się tzw. metodę składnikową (ang. *ingredient-based*).

**2. Niestabilność
atmosferyczna**

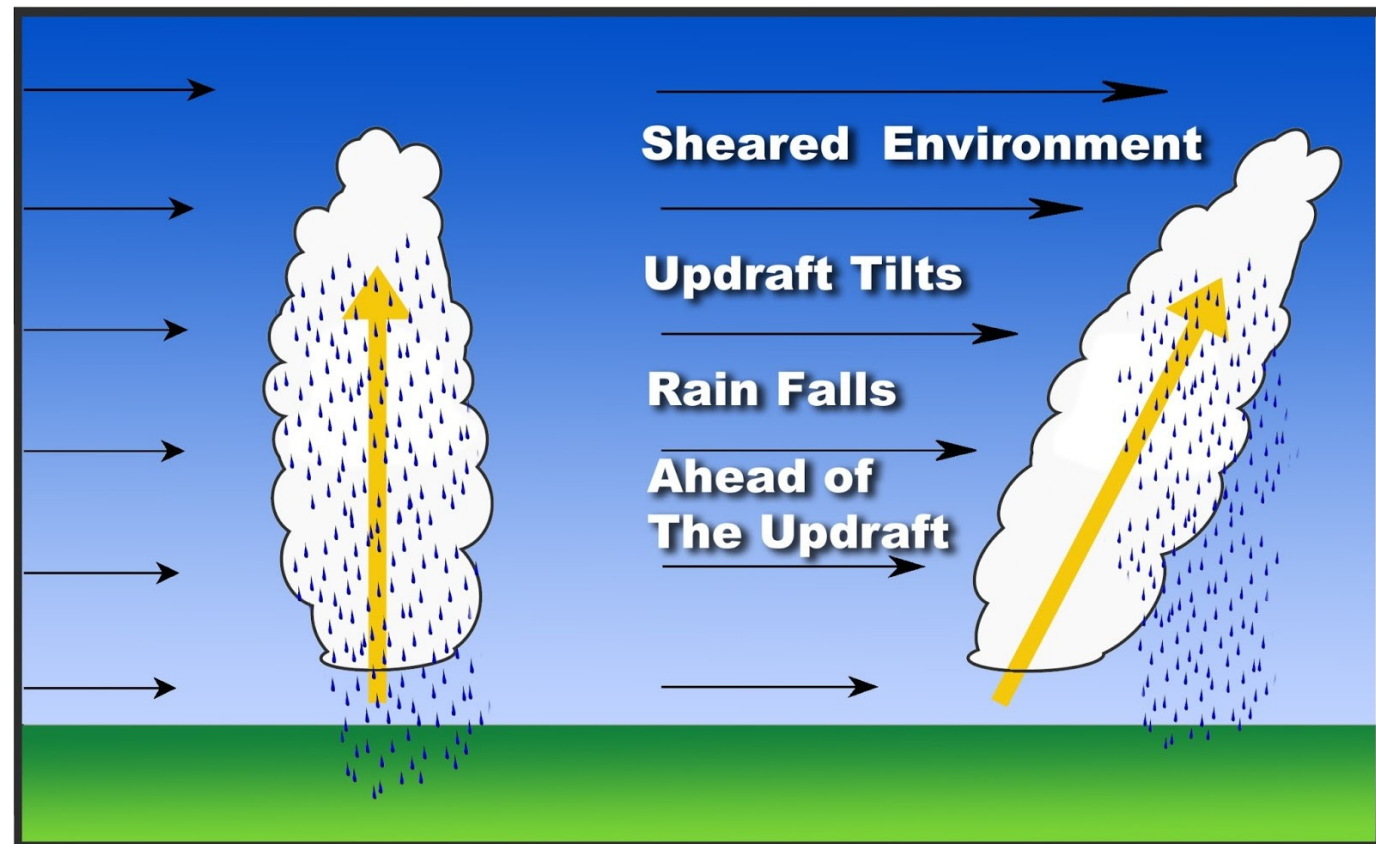
1. Wilgoć



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście organizacji chmur burzowych, rozważa się czwarty składnik.

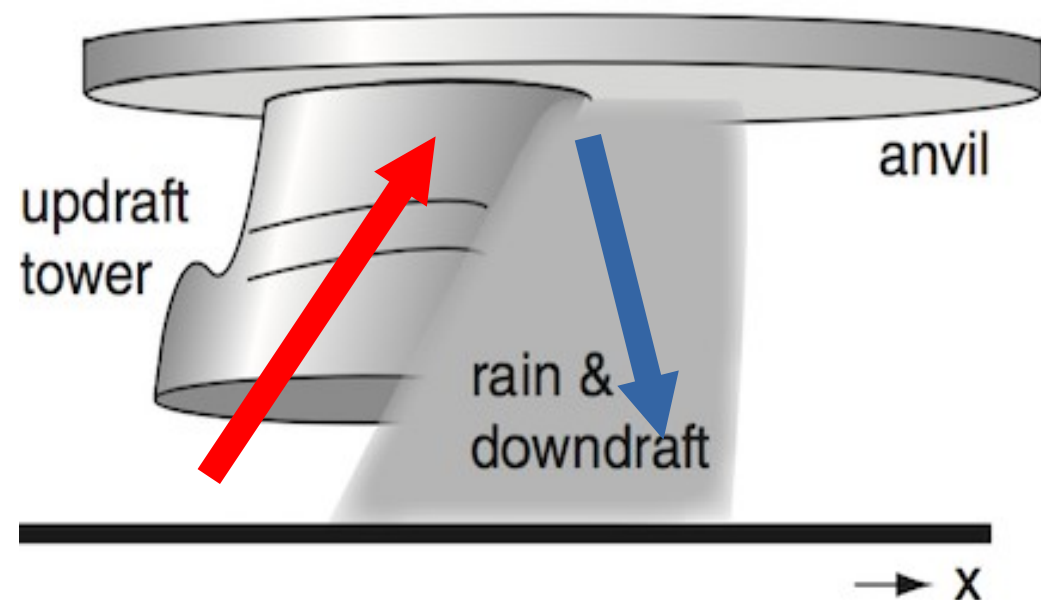
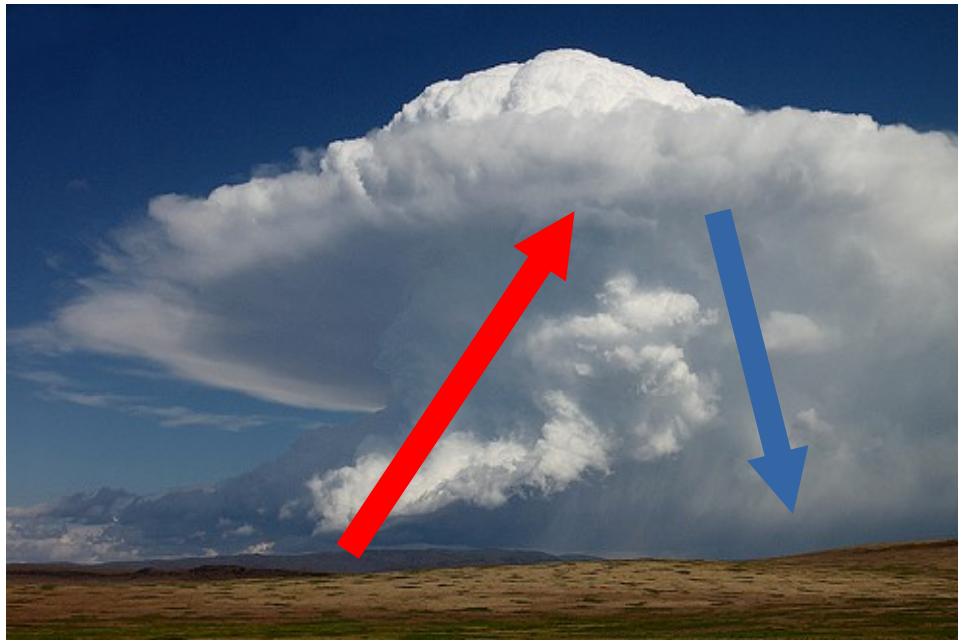
4. Uskok wiatru



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście organizacji chmur burzowych, rozważa się czwarty składnik.

4. Uskok wiatru



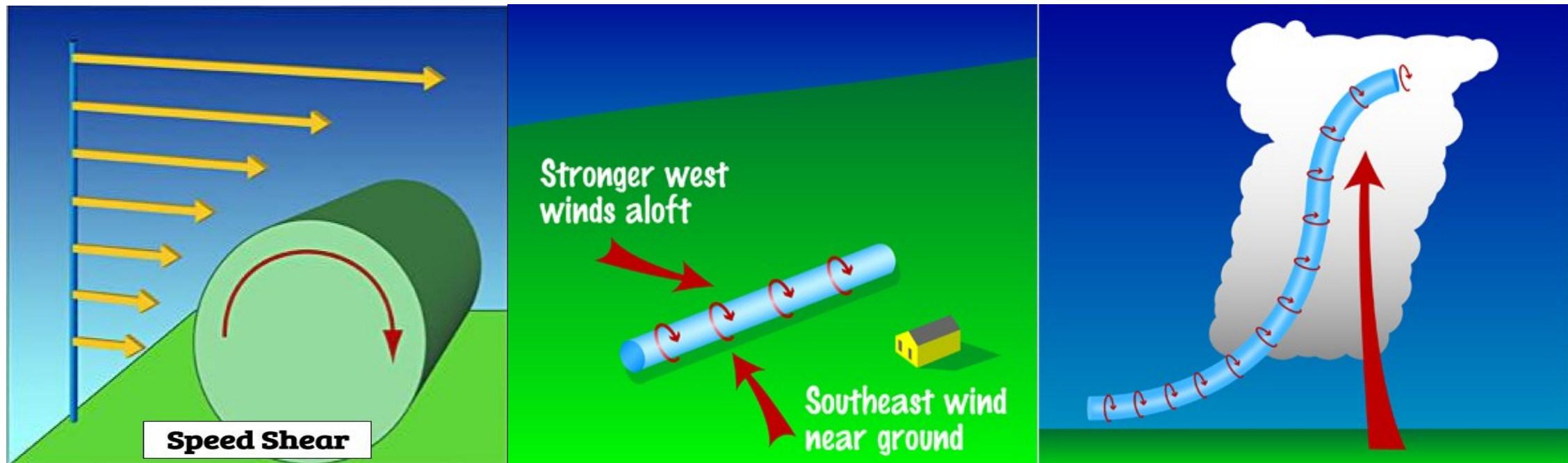
Uproszczony model powstawania burz



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście organizacji chmur burzowych, rozważa się czwarty składnik.

4. Uskok wiatru



Uproszczony model powstawania burz

W kontekście organizacji chmur burzowych, rozważa się czwarty składnik.

4. Uskok wiatru

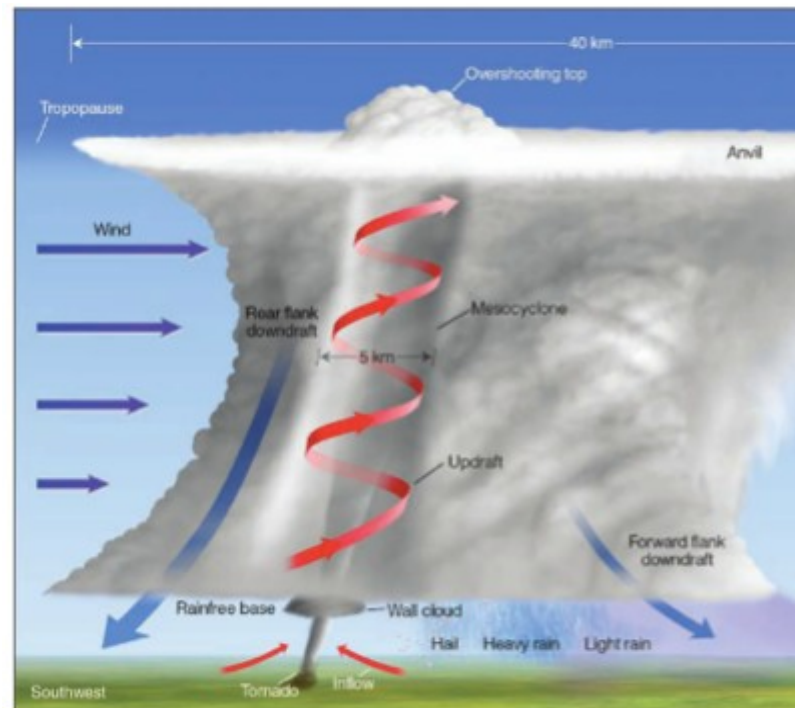
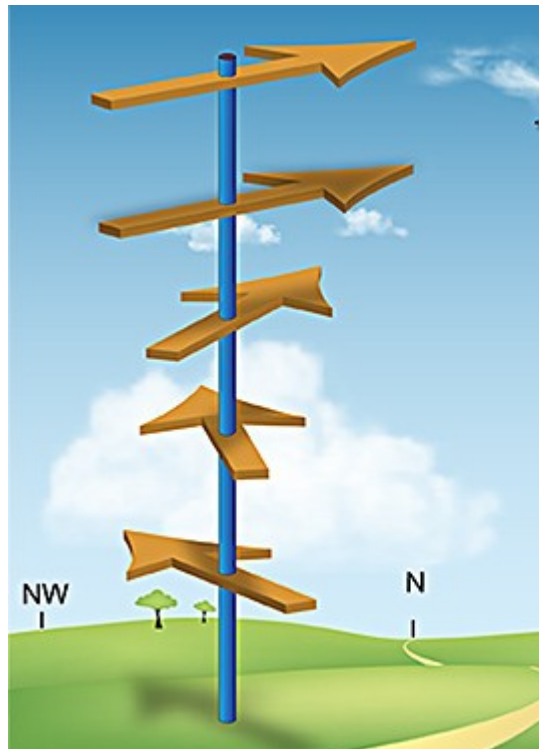


FIGURE 10.18 Some of the features associated with a classic tornado-breeding supercell storm moving to the northeast.



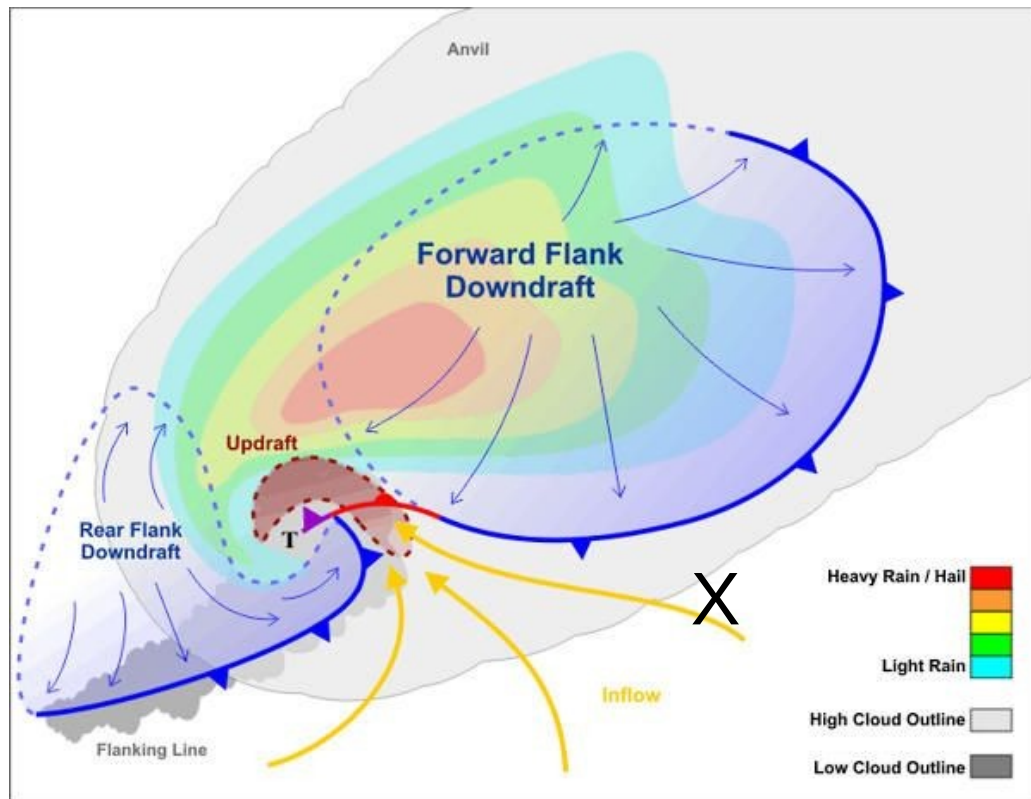
Uproszczony model powstawania burz

W kontekście organizacji chmur burzowych, rozważa się czwarty składnik.

4. Uskok wiatru



Superkomórka burzowa

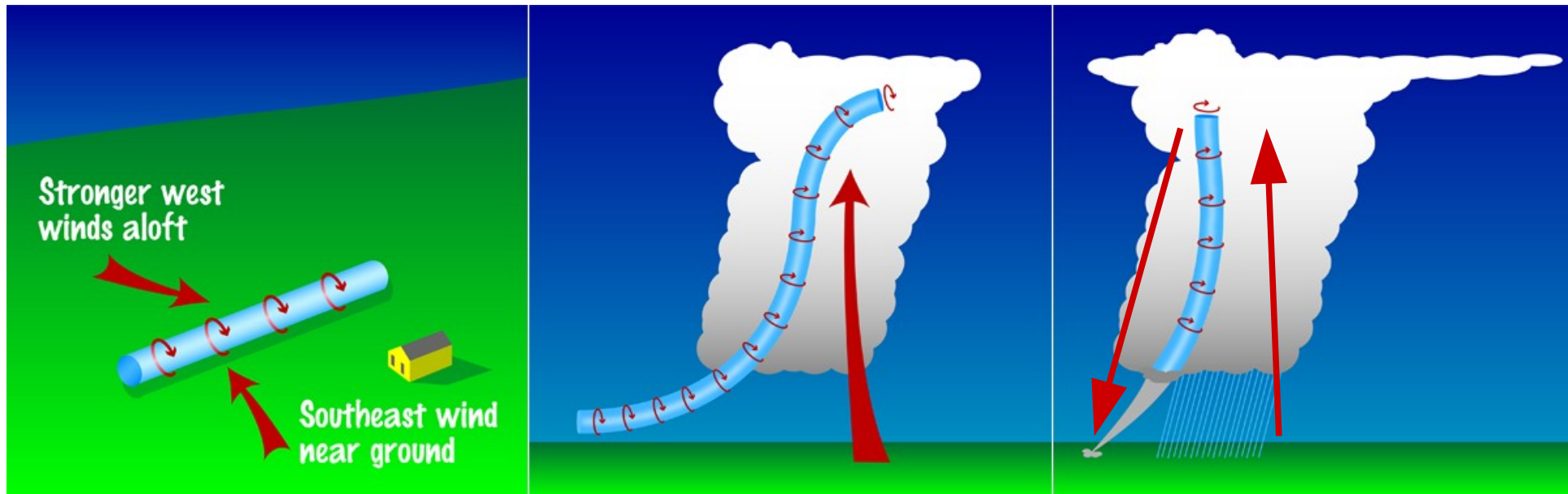


Widok od strony południowo-wschodniej
(superkomórka w stadium dojrzałym)



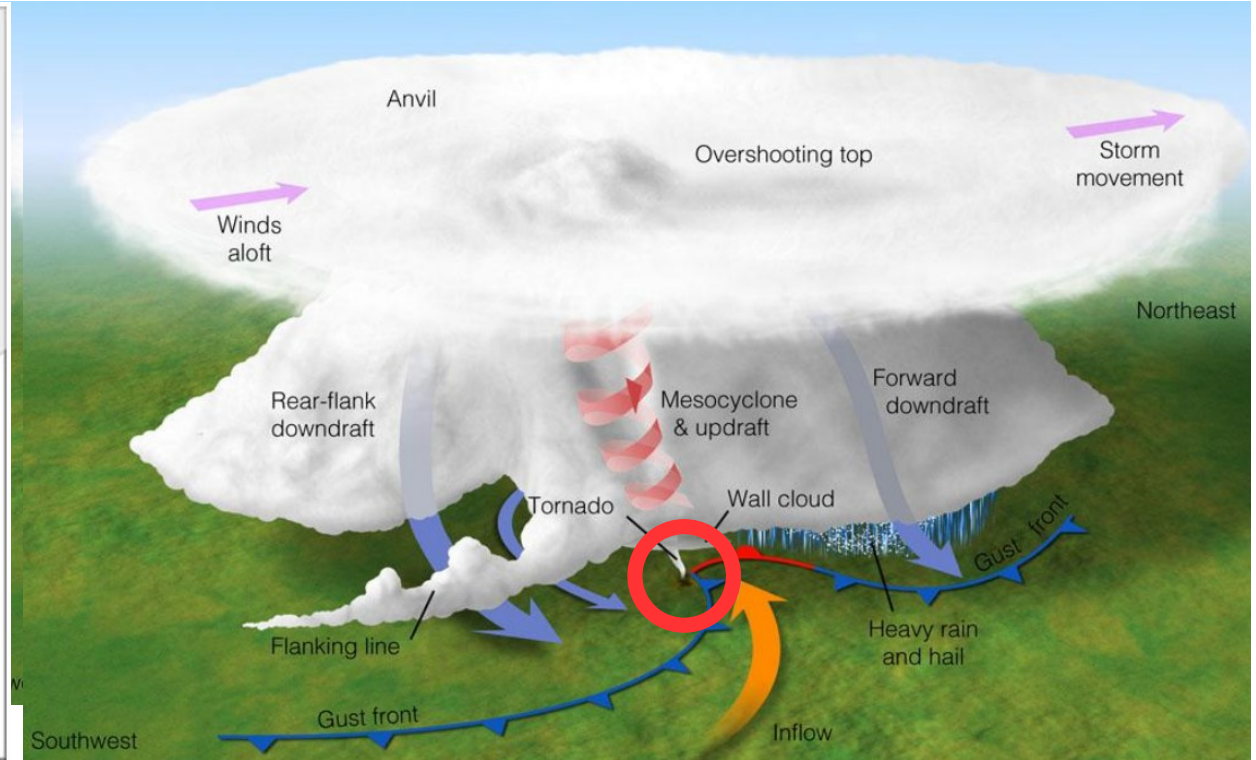
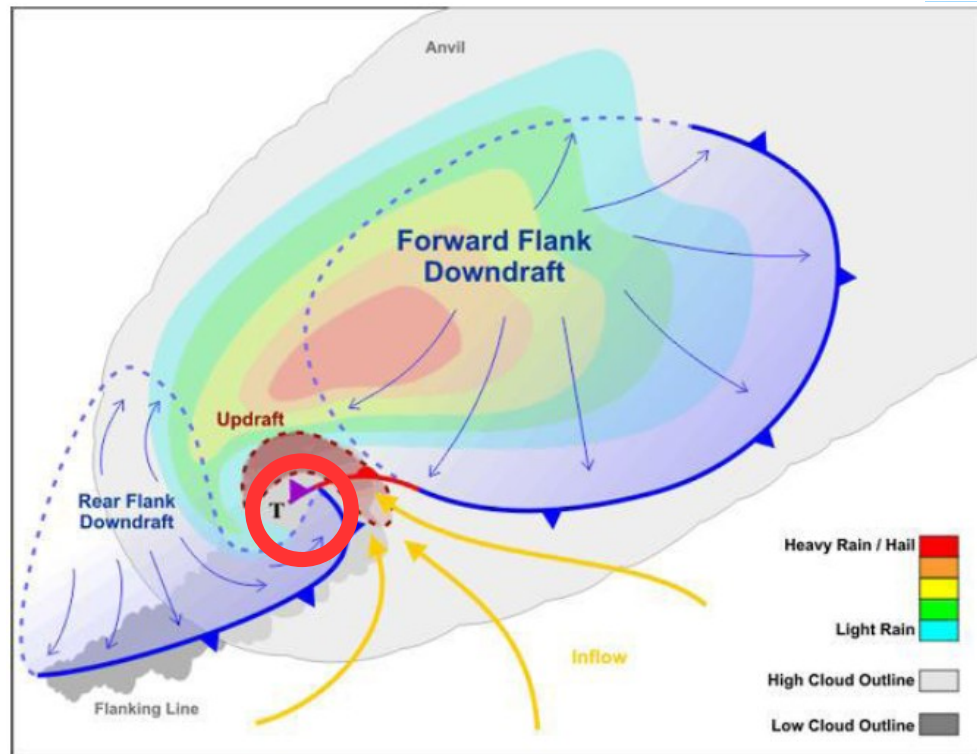
Superkomórka burzowa

Sprowadzenie mezocyklonu do powierzchni ziemi (w wyniku działalności tylnego prądu zstępującego), może doprowadzić do powstania tornada.

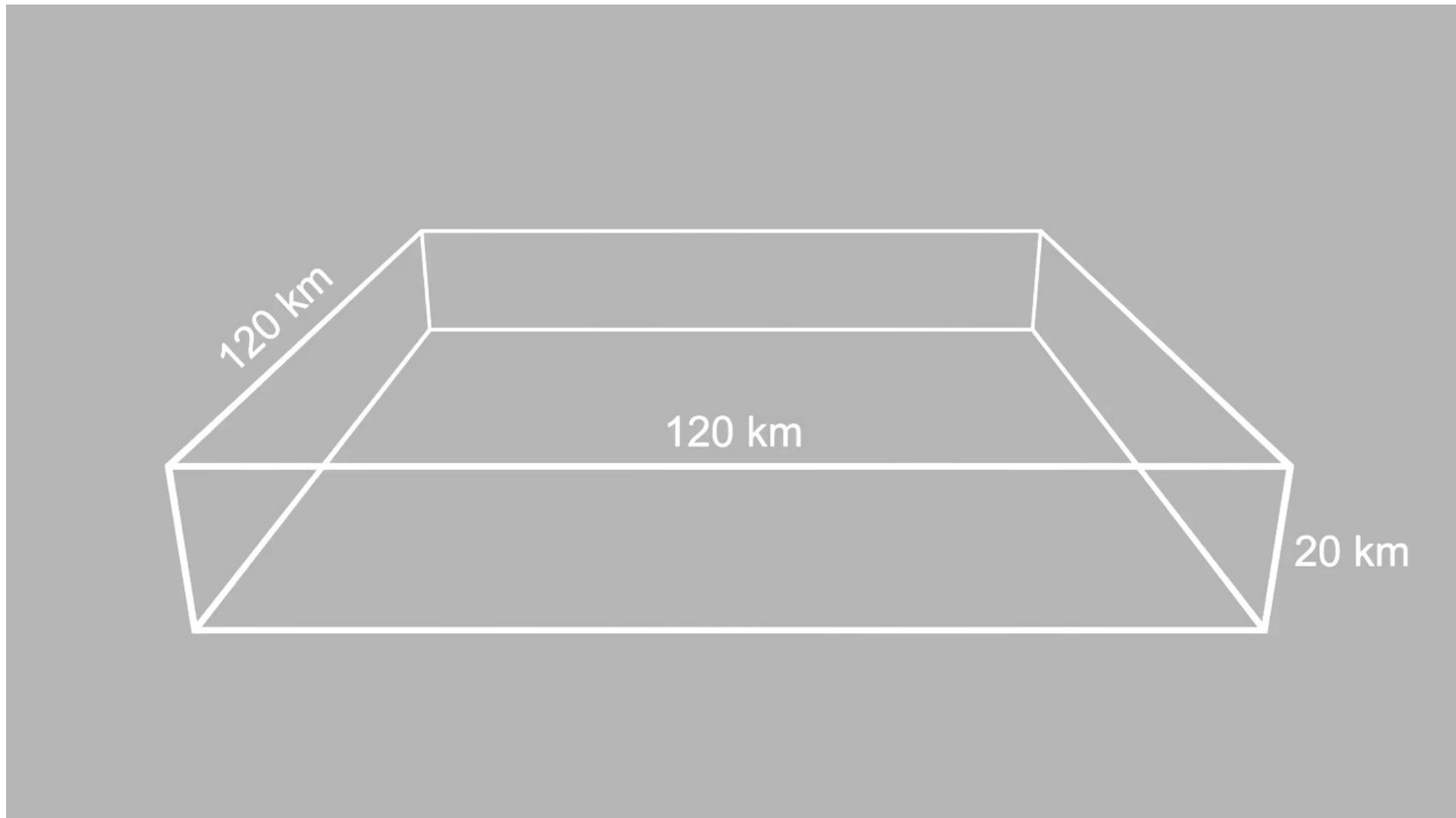


Superkomórka burzowa

Sprowadzenie mezocyklonu do powierzchni ziemi (w wyniku działalności tylnego prądu zstępującego), może doprowadzić do powstania tornada.



Symulacja superkomórki i tornada EF5 (24.05.2011 - El Reno, Oklahoma)



Tornada

- Najsilniejsze punktowe zjawisko atmosferyczne na ziemi.
- Najsilniejsze tornada potrafią osiągać prędkość w wirze przekraczającą 500 km/h i zrównać budynki z powierzchnią ziemi.
- Ze względu na genezę powstawania wyróżnia się:
 - **tornada mezocykloniczne**
(ang. *mesocyclonic tornadoes*)
 - **tornada nie-mezocykloniczne**
(ang. *non-mesocyclonic tornadoes*)



Tornado

Wirująca kolumna powietrza, rozciągająca się w pionie od podstawy chmury, aż do powierzchni ziemi, która jest na tyle silna, aby wygenerować zniszczenia.



Tornado

Wirująca kolumna powietrza, rozciągająca się w pionie od podstawy chmury, aż do powierzchni ziemi, która jest na tyle silna, aby wygenerować zniszczenia.



Gustnado – płytkie i krótkotrwałe zawirowanie w strefie linii szkwału (strefy odpływu).

Tornado

Wirująca kolumna powietrza, rozciągająca się w pionie od podstawy chmury, aż do powierzchni ziemi, która jest na tyle silna, aby wygenerować zniszczenia.



Gustnado – płytkie i krótkotrwałe zawirowanie w strefie linii szkwału (strefy odpływu).



Lejek kondensacyjny – wir nie osiągający powierzchni ziemi.

Tornado

Wirująca kolumna powietrza, rozciągająca się w pionie od podstawy chmury, aż do powierzchni ziemi, która jest na tyle silna, aby wygenerować zniszczenia.



Gustnado – płytkie i krótkotrwałe zawirowanie w strefie linii szkwału (strefy odpływu).



Lejek kondensacyjny – wir nie osiągający powierzchni ziemi.



Diabełek piaskowy – zawirowanie w wyniku silnego nagrzewania powierzchni o niskiej pojemności cieplnej (np. piasek)

Tornado

Wirująca kolumna powietrza, rozciągająca się w pionie od podstawy chmury, aż do powierzchni ziemi, która jest na tyle silna, aby wygenerować zniszczenia.



Gustnado – płytkie i krótkotrwałe zawirowanie w strefie linii szkwału (strefy odpływu).



Lejek kondensacyjny – wir nie osiągający powierzchni ziemi.



Diabełek piaskowy – zawirowanie w wyniku silnego nagrzewania powierzchni o niskiej pojemności cieplnej (np. piasek)

Tornado w Pilger (Nebraska), 16.06.2014



Tornado w Oklahoma City (Oklahoma), 02.05.1999



Tornado w Joplin (Missouri), 22.05.2011



Tornado w Joplin (Missouri), 22.05.2011



Schrony przed tornadem



Schrony przed tornadem



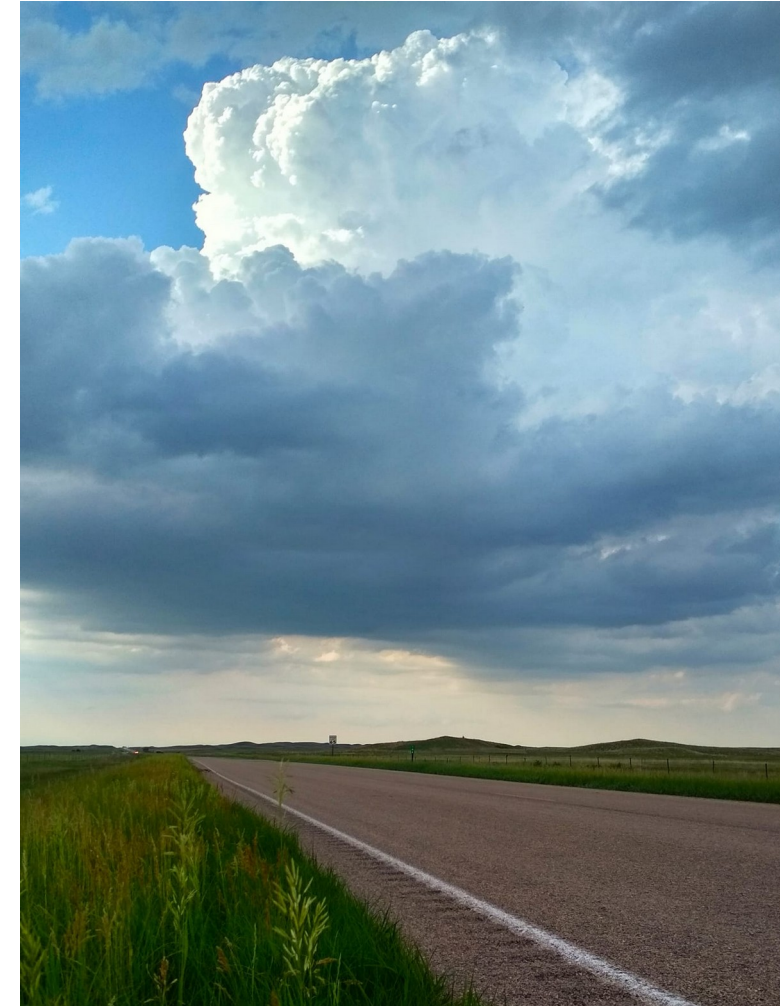
Schrony przed tornadem



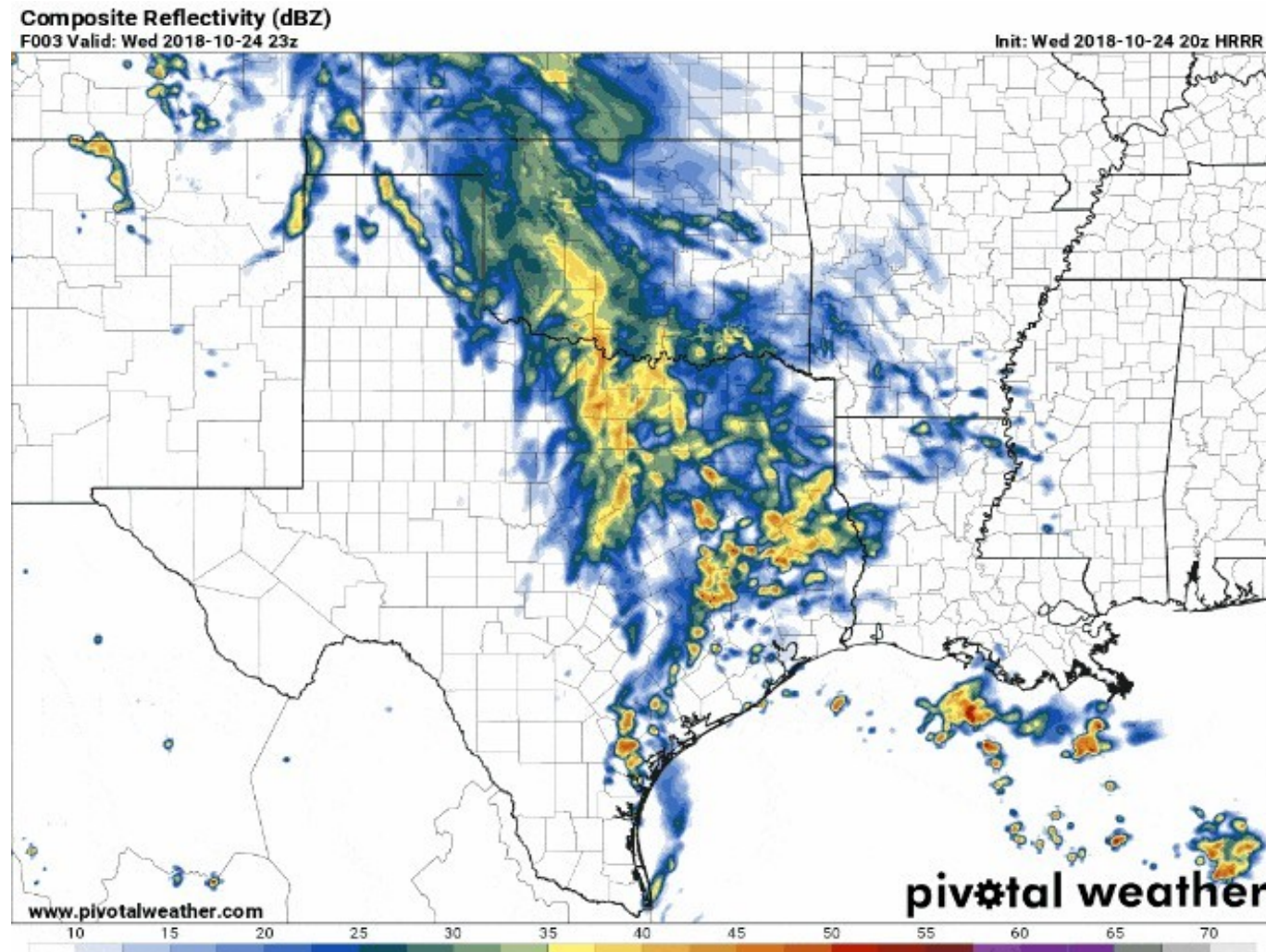


Burza burzy jest więc nierówna!

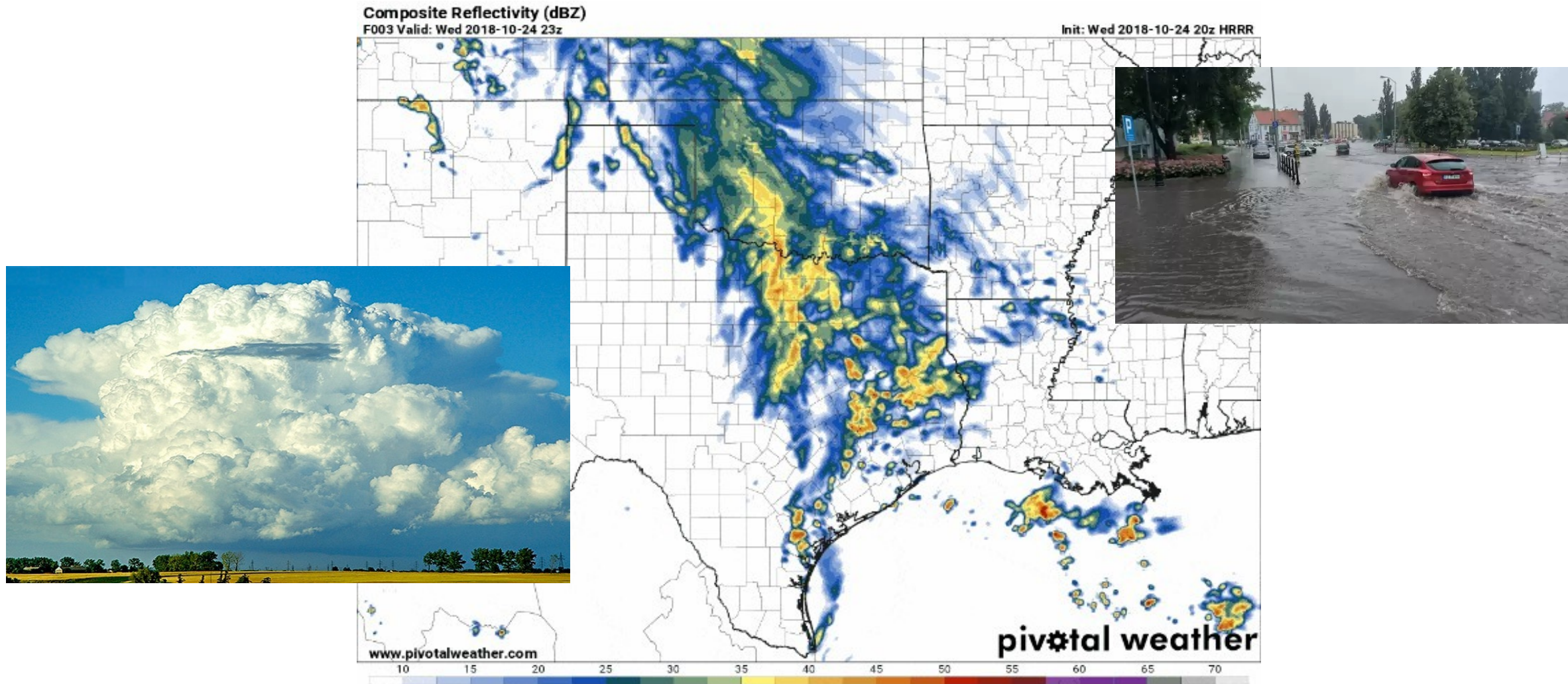
Konwekcja może zorganizować się
w rozmaite struktury morfologiczne
różniące się pod względem
zasięgów przestrzennych
oraz zjawisk towarzyszących.



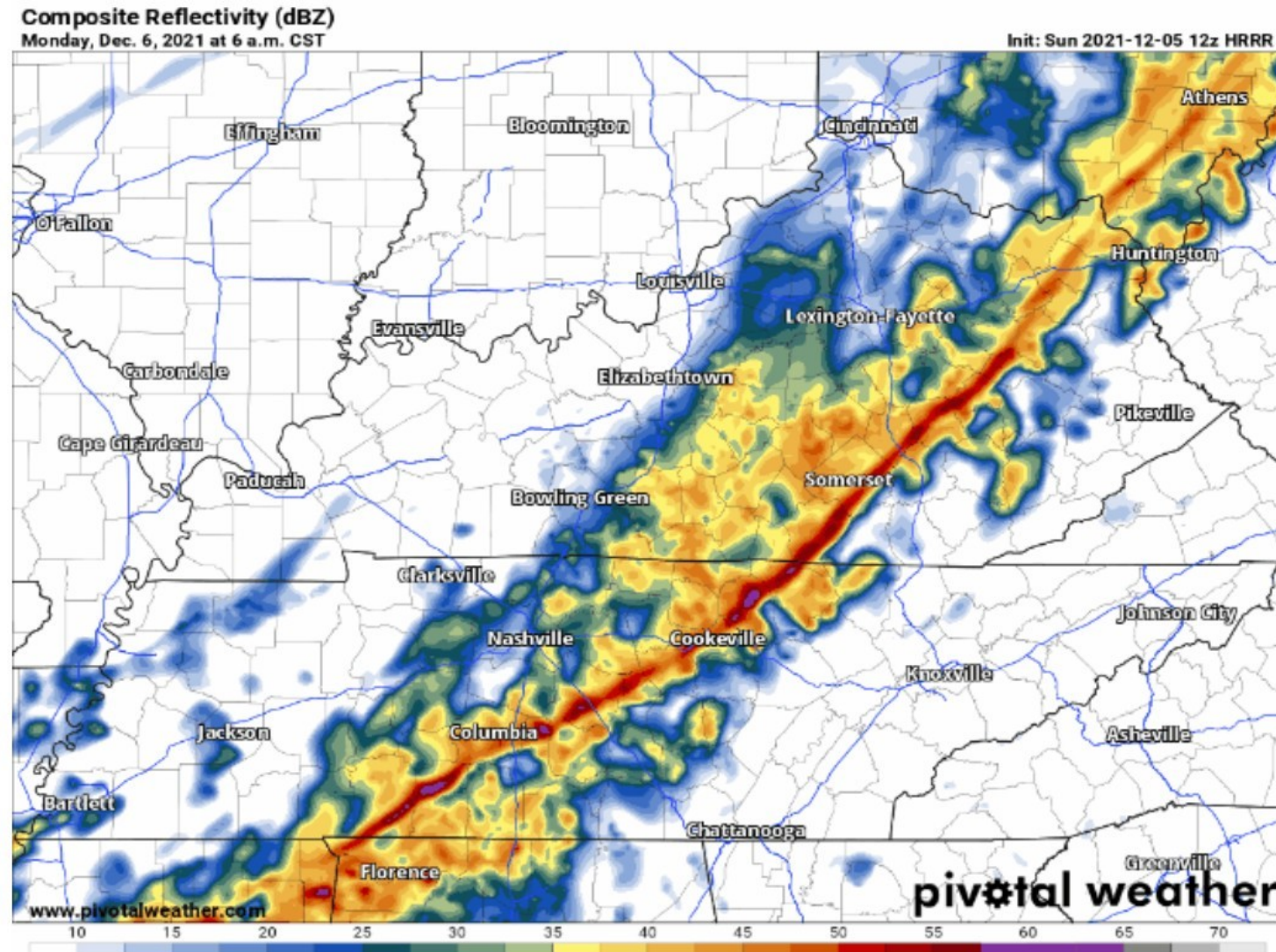
Wielokomórkowe klastry



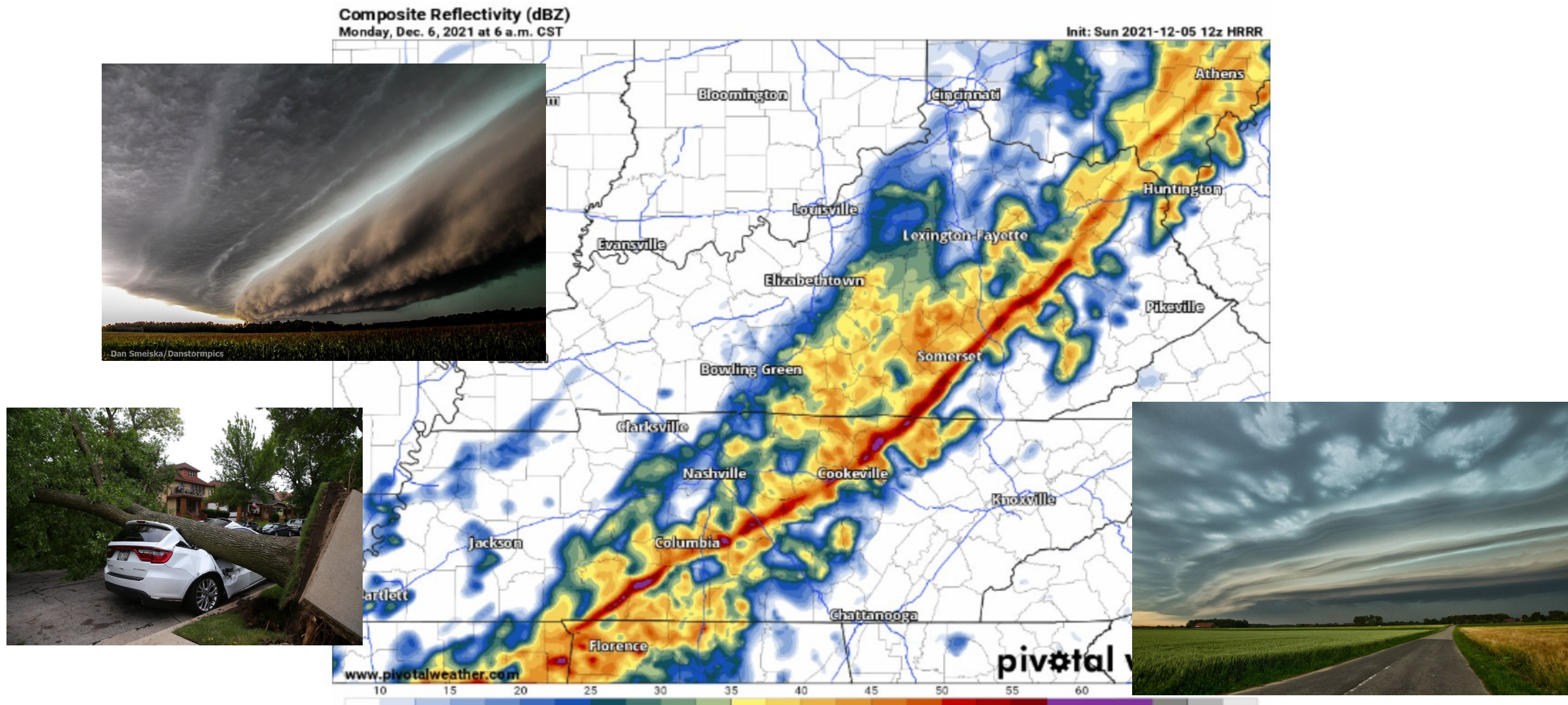
Wielokomórkowe klastry



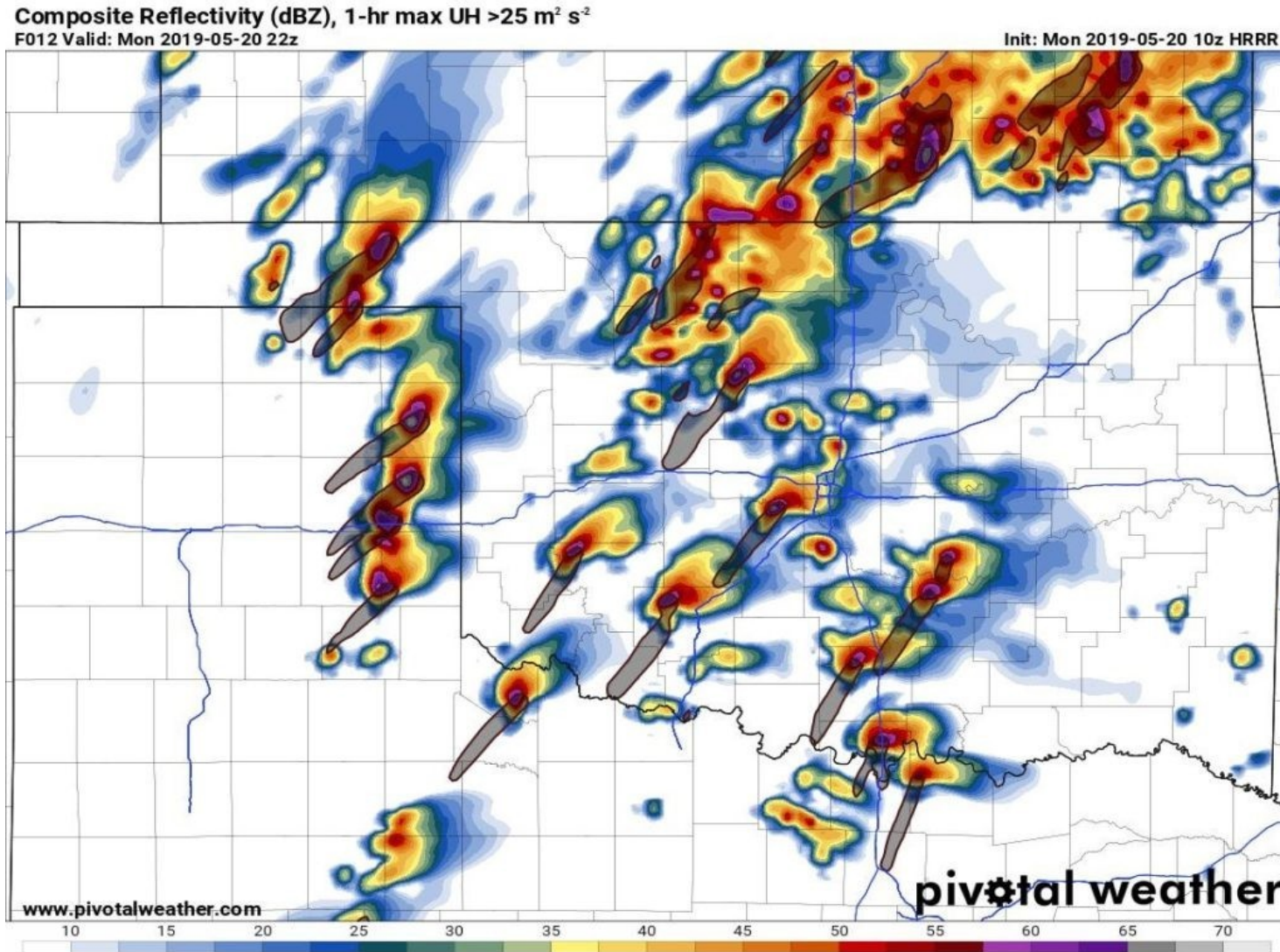
Linia szkwału



Linia szkwału



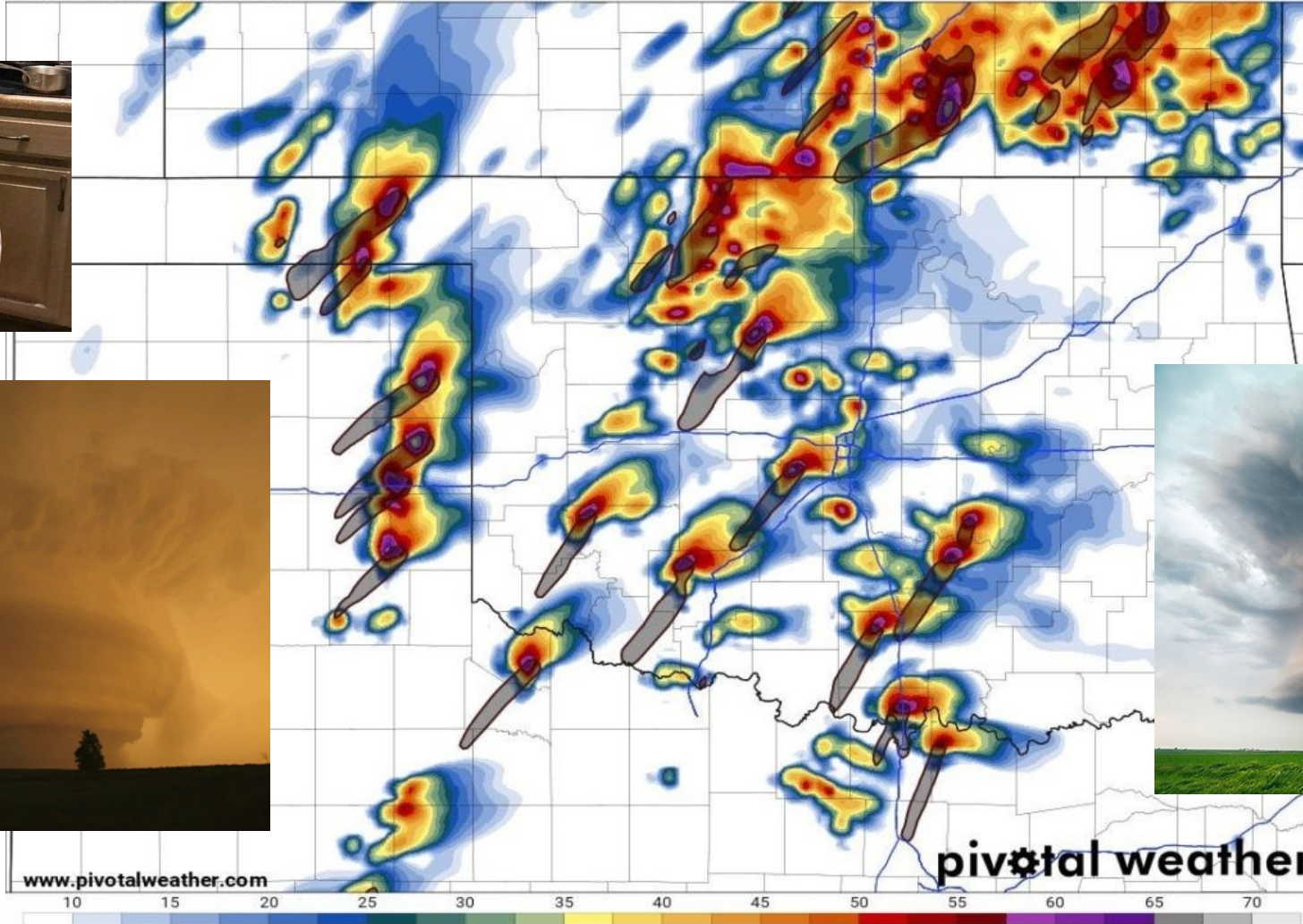
Izolowane burze superkomórkowe



Izolowane burze superkomórkowe

Composite Reflectivity (dBZ), 1-hr max UH $>25 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
F012 Valid: Mon 2019-05-20 22z

Init: Mon 2019-05-20 10z HRRR

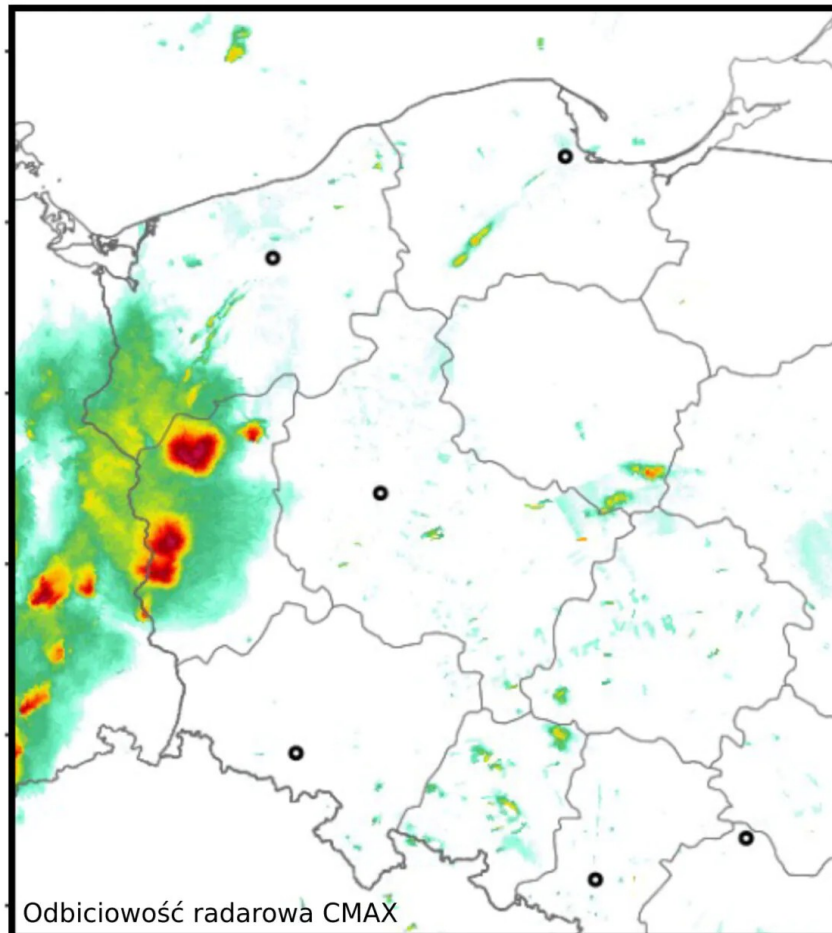


www.pivotalweather.com

pivotal weather

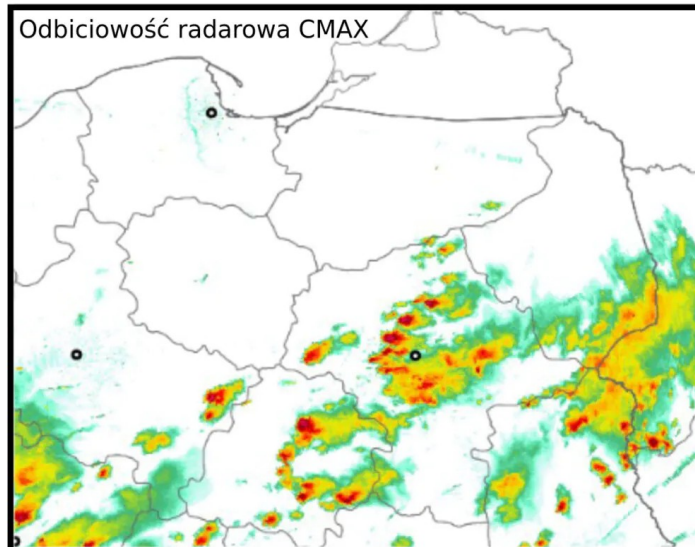
Przykład burzy superkomórkowej i jej skutków (lokalny duży grad)

2019-06-11 19:10

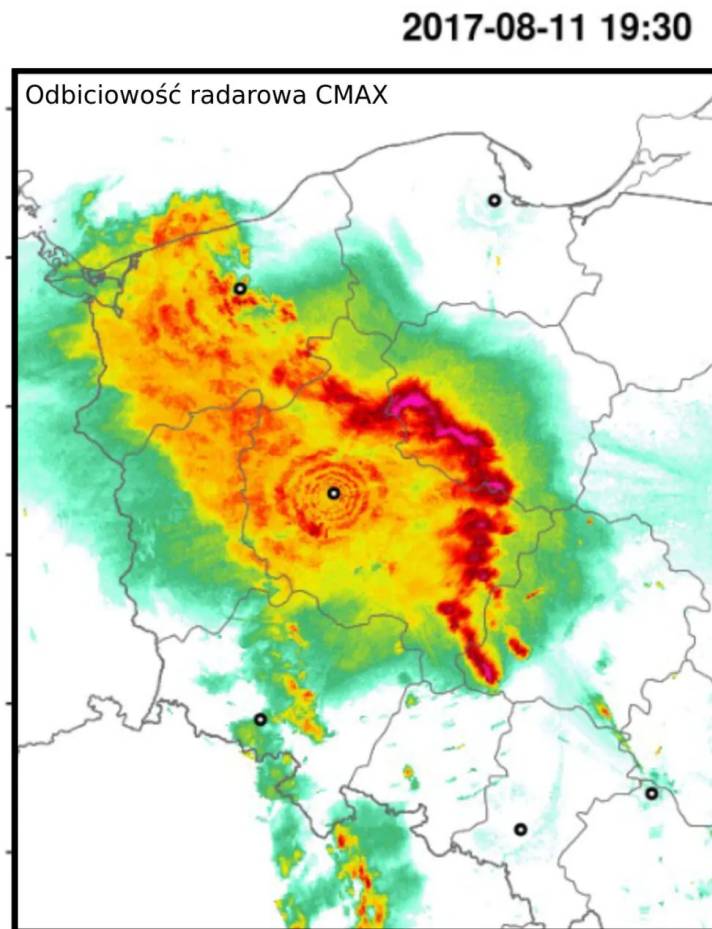


Przykład burzy wielokomórkowej i jej skutków (powódź błyskawiczna)

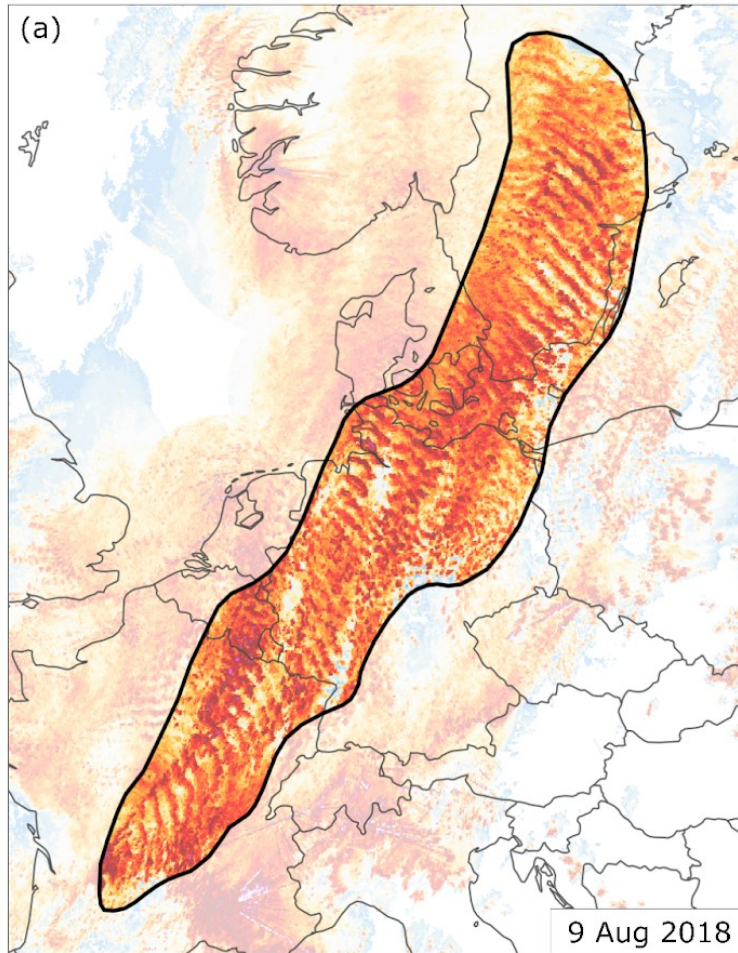
2013-06-09 13:50



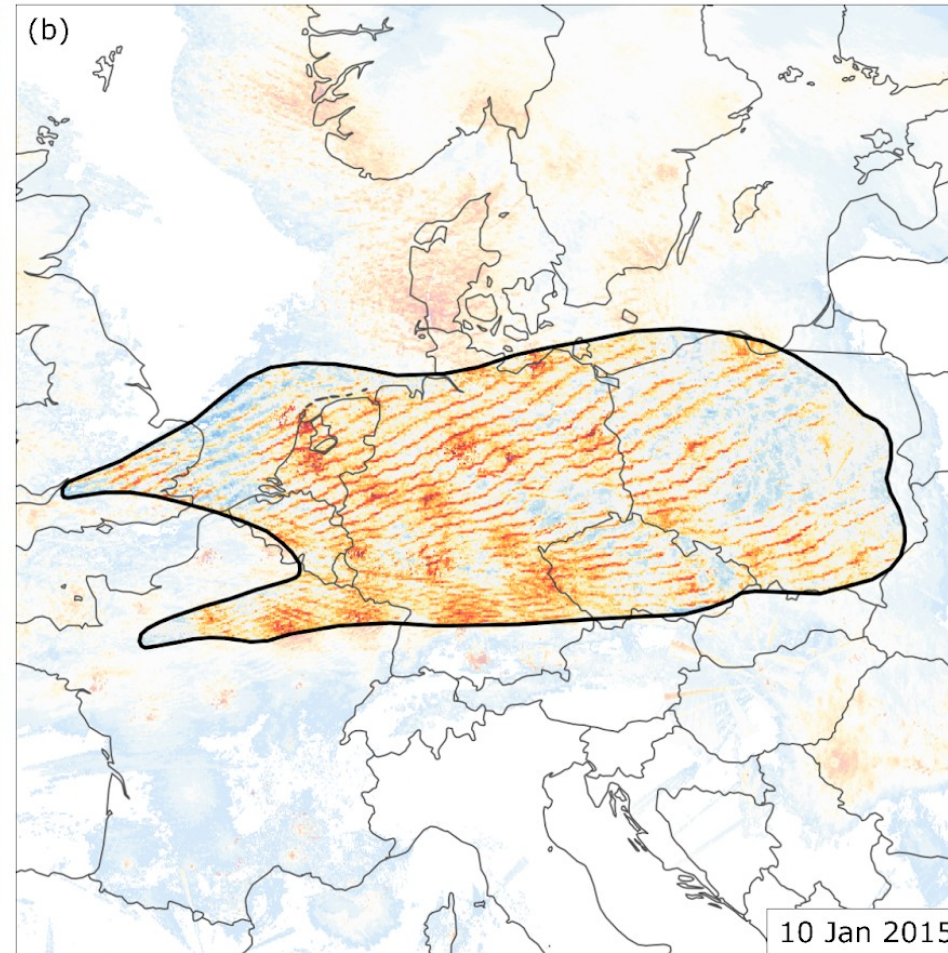
Przykład linii szkwału i jej skutków (rozległe zniszczenia wiatrowe)



Longest QLCS track (2200 km)

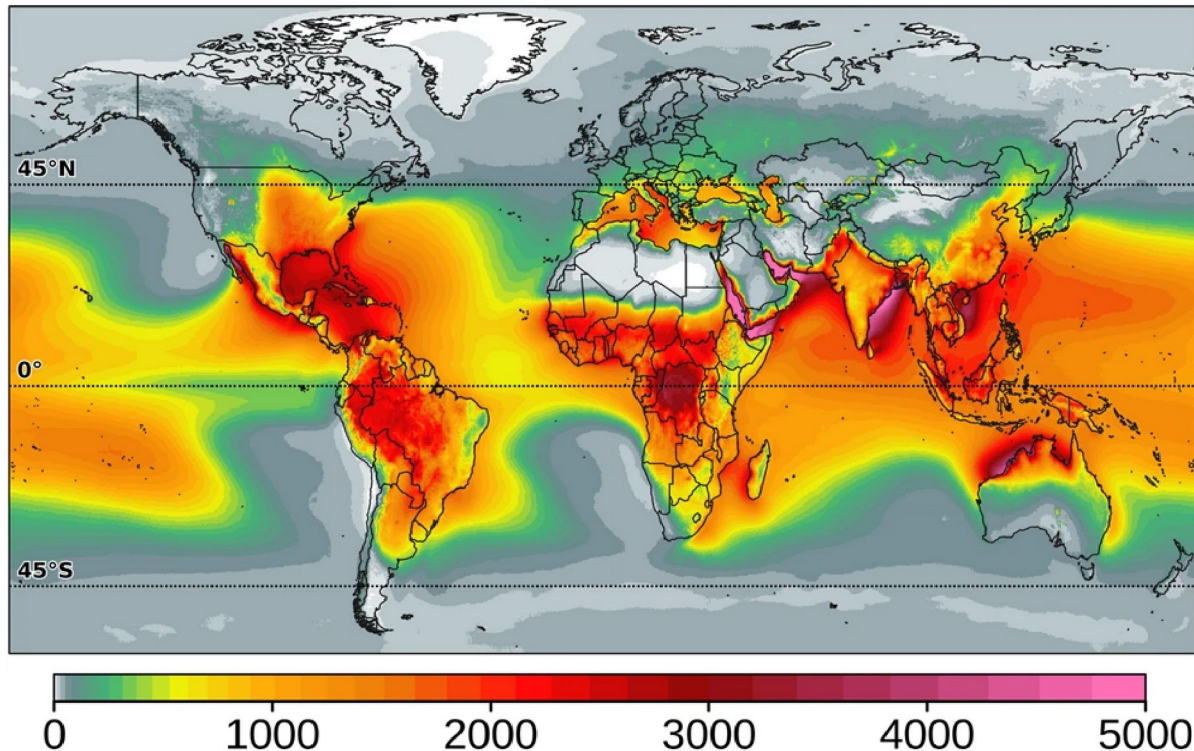


Widest QLCS track (1635 km)

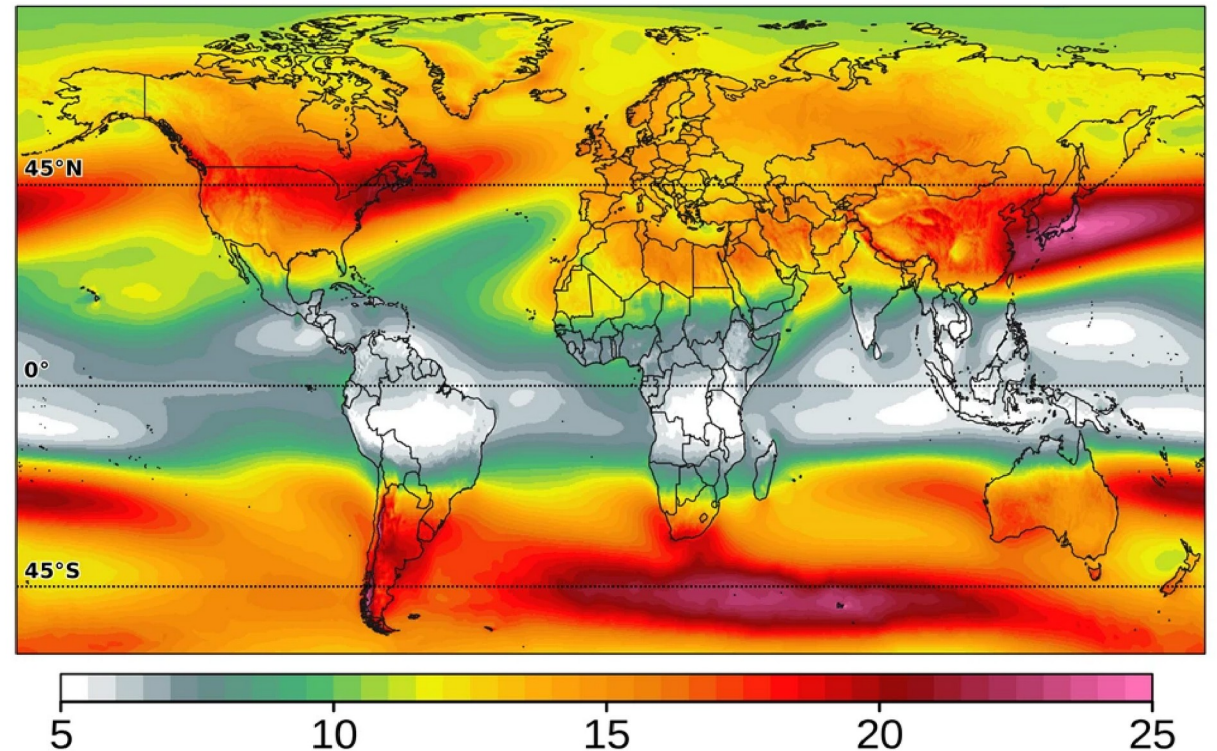


Klimatologiczne uwarunkowania burz na świecie

Rozkład przestrzenny **CAPE** [J/kg]
(95 percentyl, średnia wieloletnia)

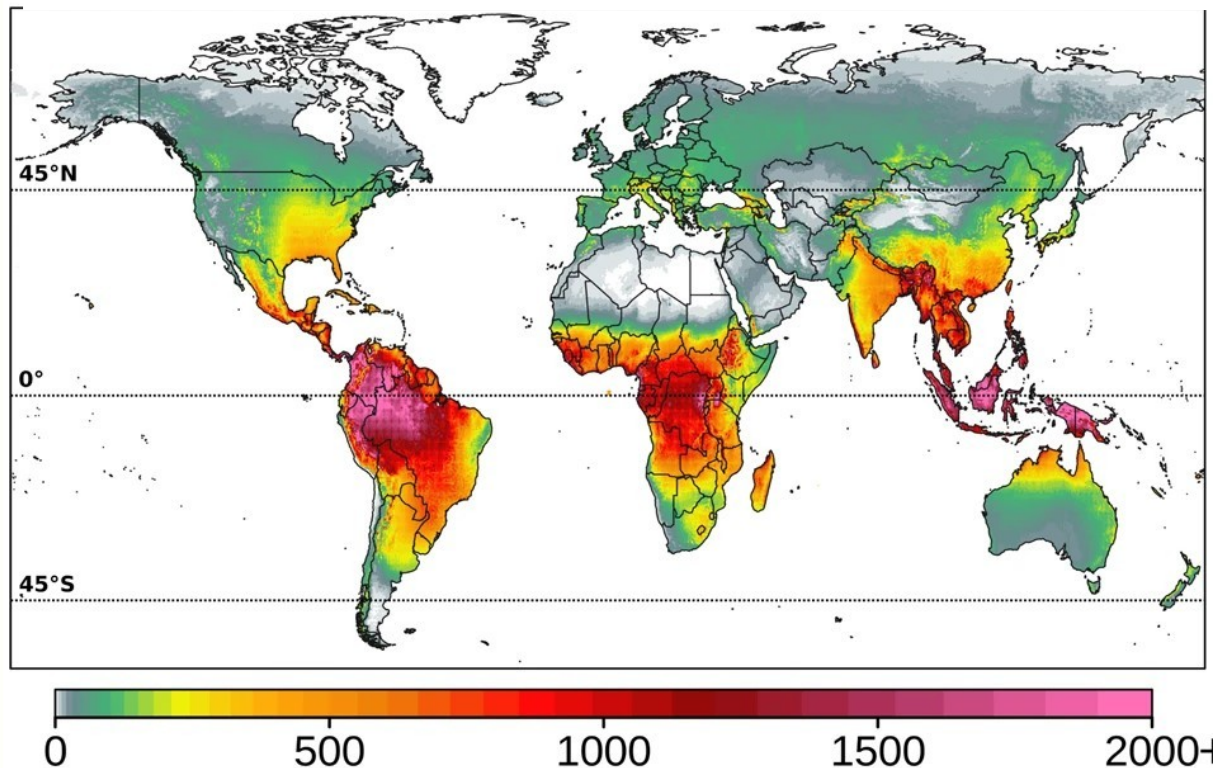


Rozkład przestrzenny **uskoku wiatru 0-6 km** [m/s]
(50 percentyl, średnia wieloletnia)

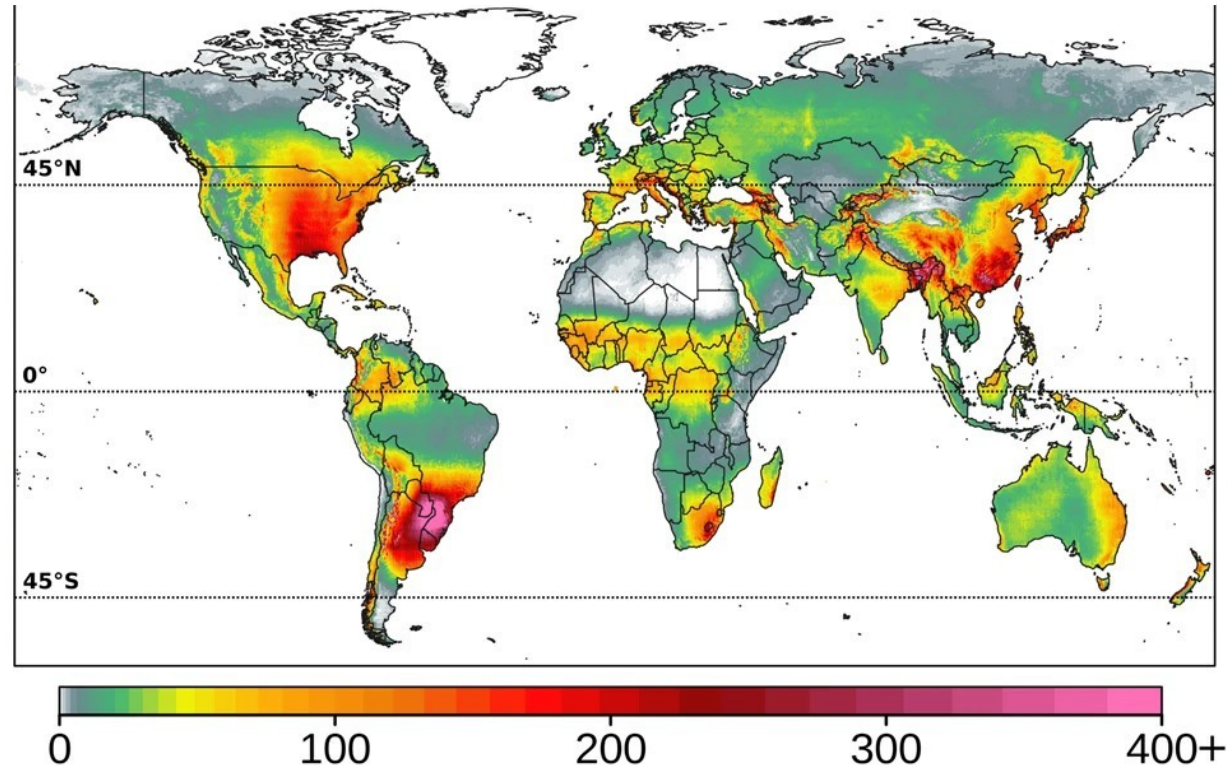


Klimatologiczne uwarunkowania burz na świecie

Średnia roczna liczba godzin z warunkami sprzyjającymi tworzeniu się **burz**

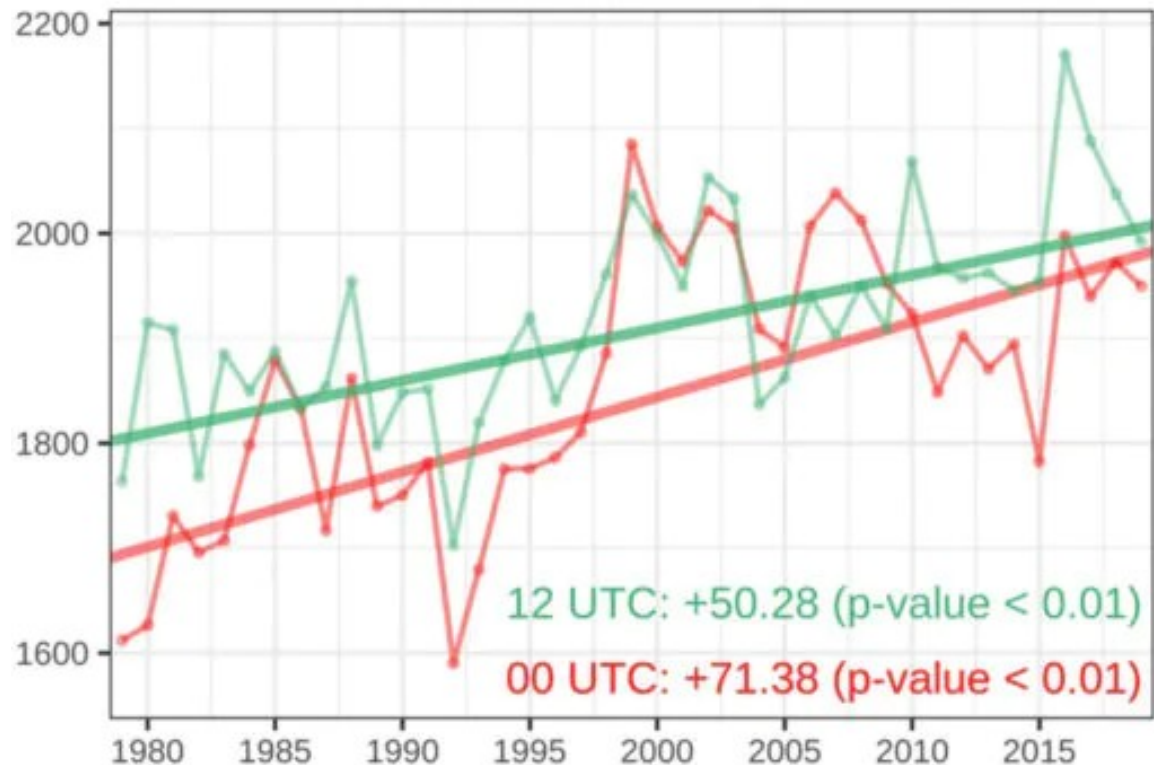


Średnia roczna liczba godzin z warunkami sprzyjającymi tworzeniu się **silnych burz**

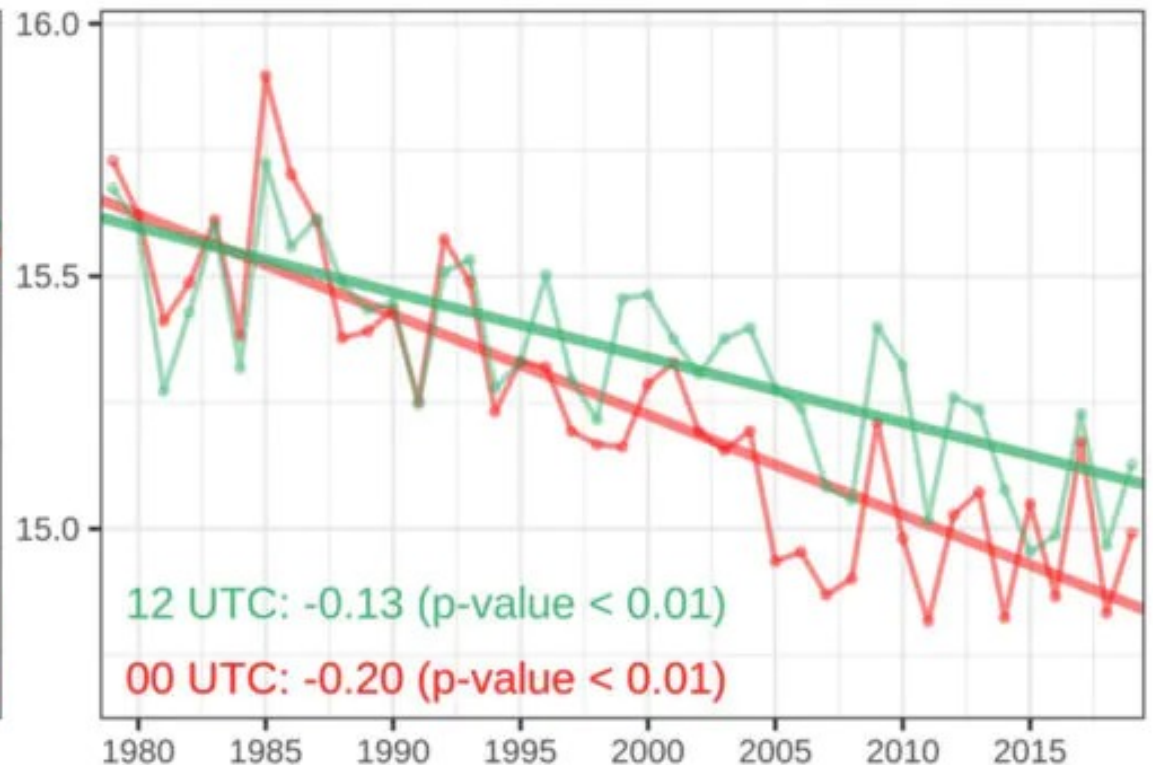


Związek zmian klimatu oraz zjawisk konwekcyjnych

Zmiany wieloletnie **CAPE** [J/kg]
(95 percentyl, globalne pomiary radiosondażowe)

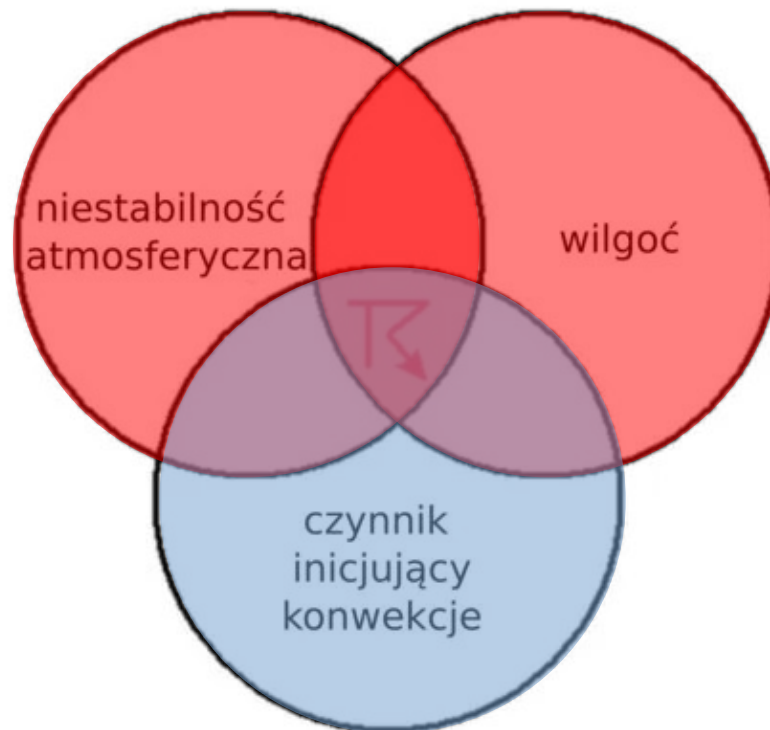


Zmiany wieloletnie **uskoku wiatru 0-6 km** [m/s]
(50 percentyl, globalne pomiary radiosondażowe)

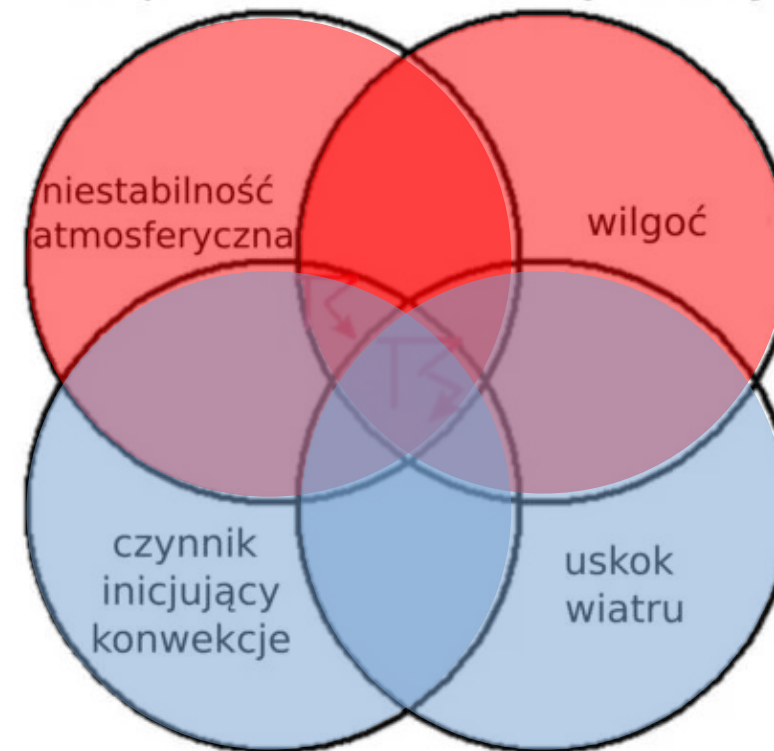


Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy

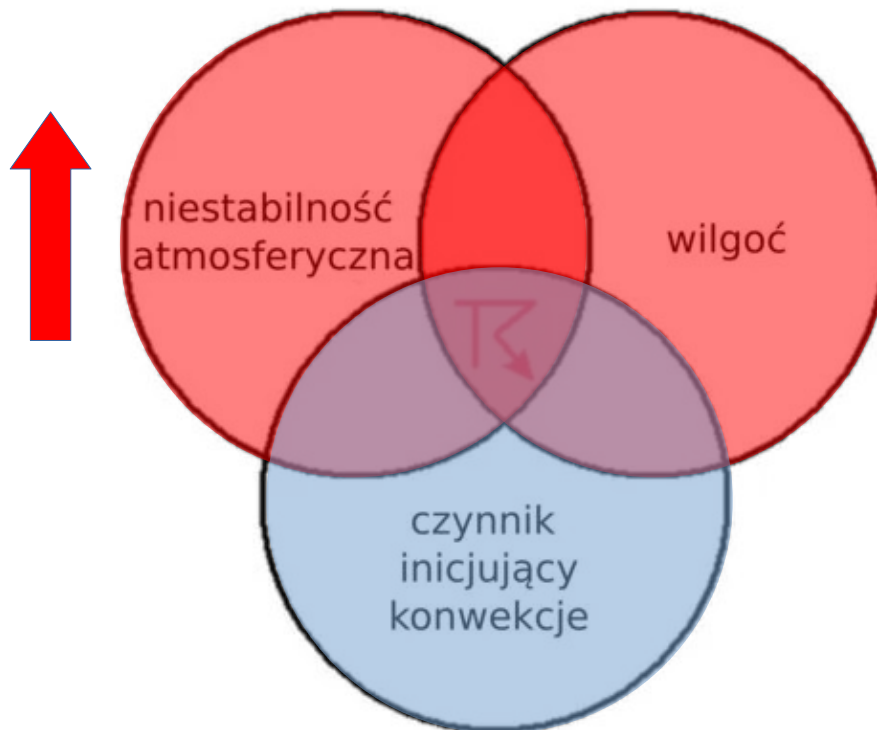


Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy

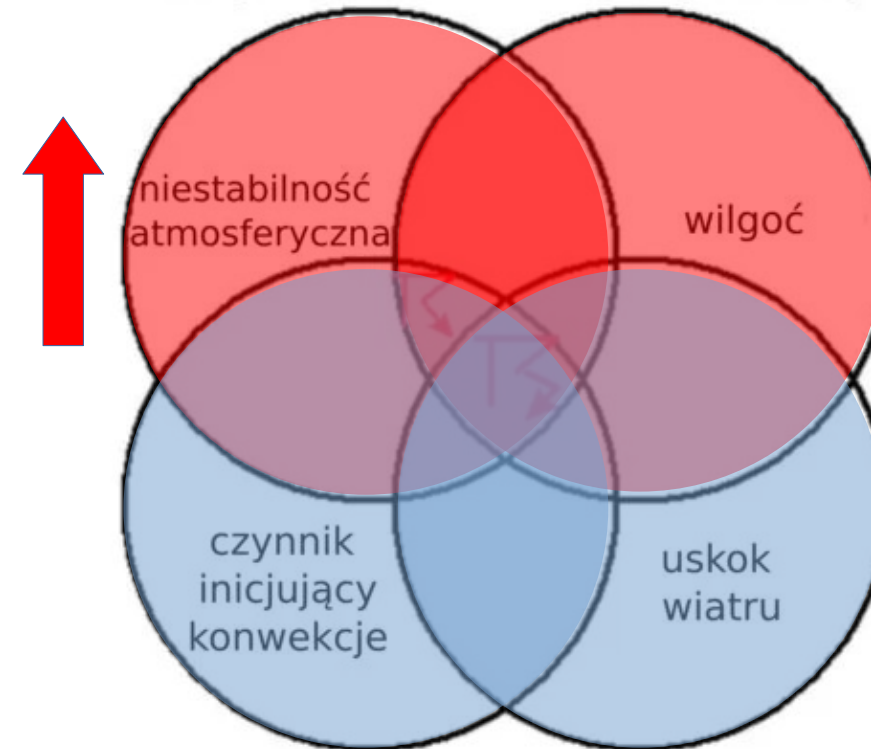


Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy

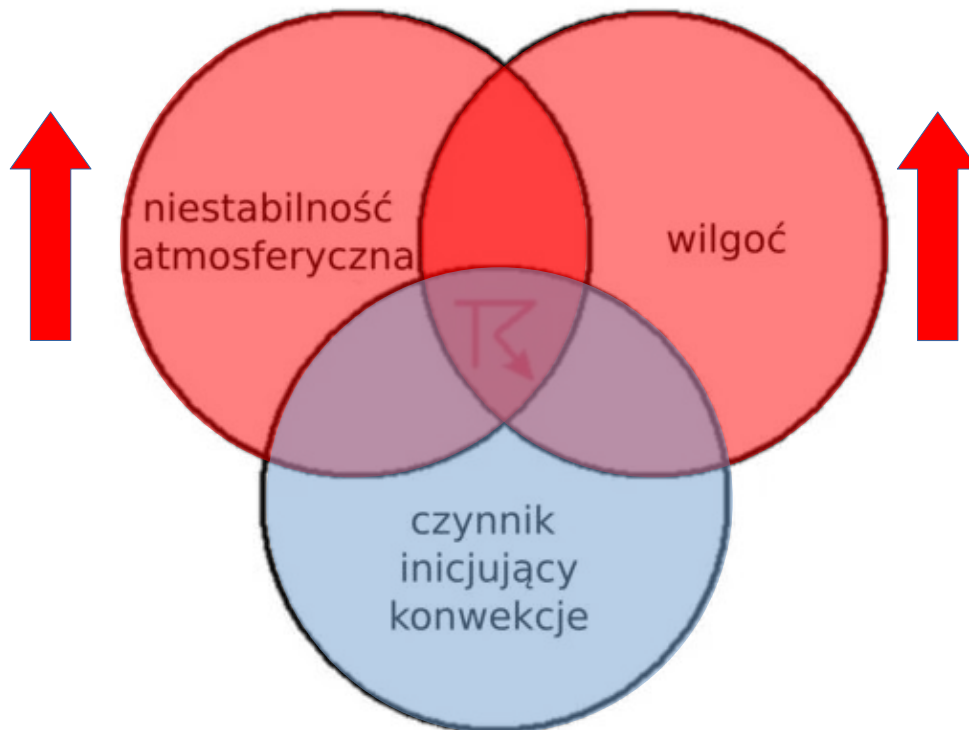


Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy

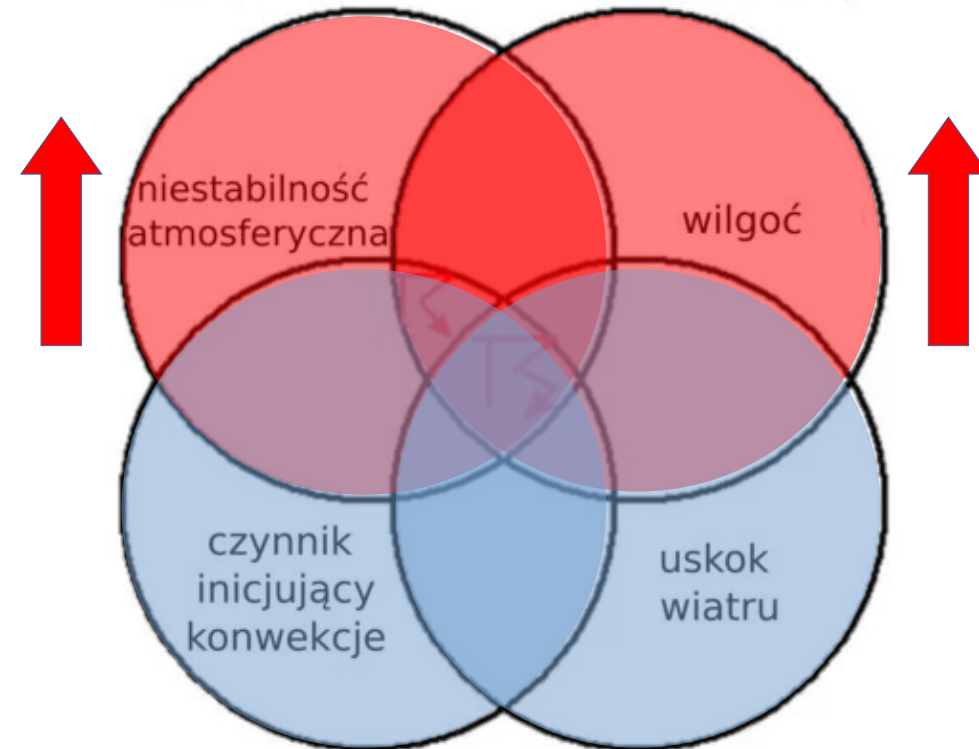


Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy

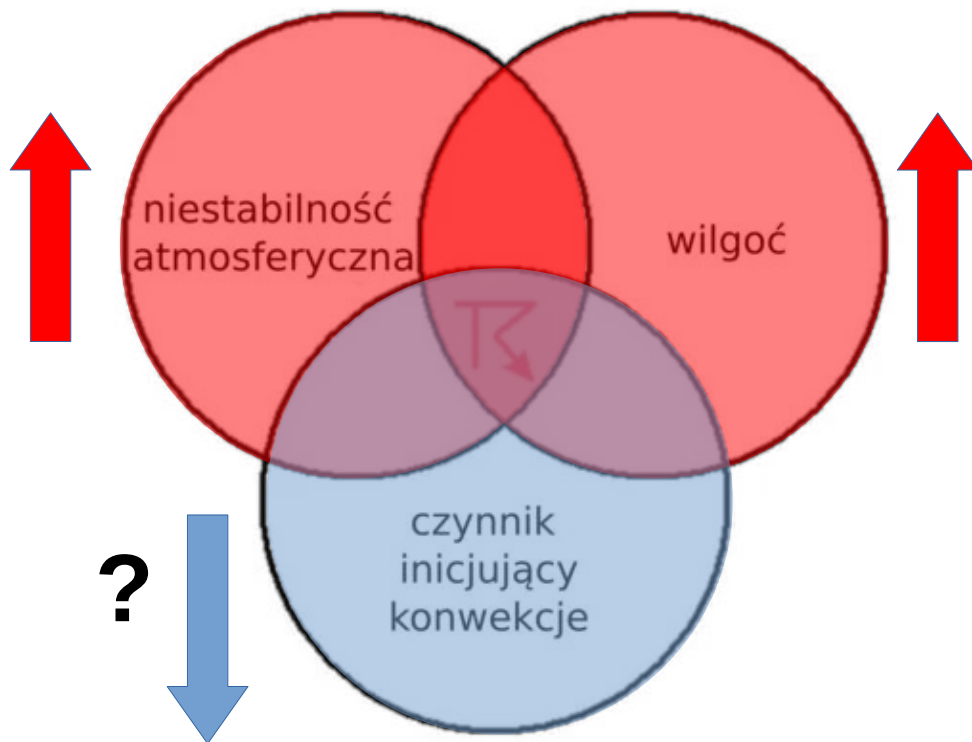


Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy

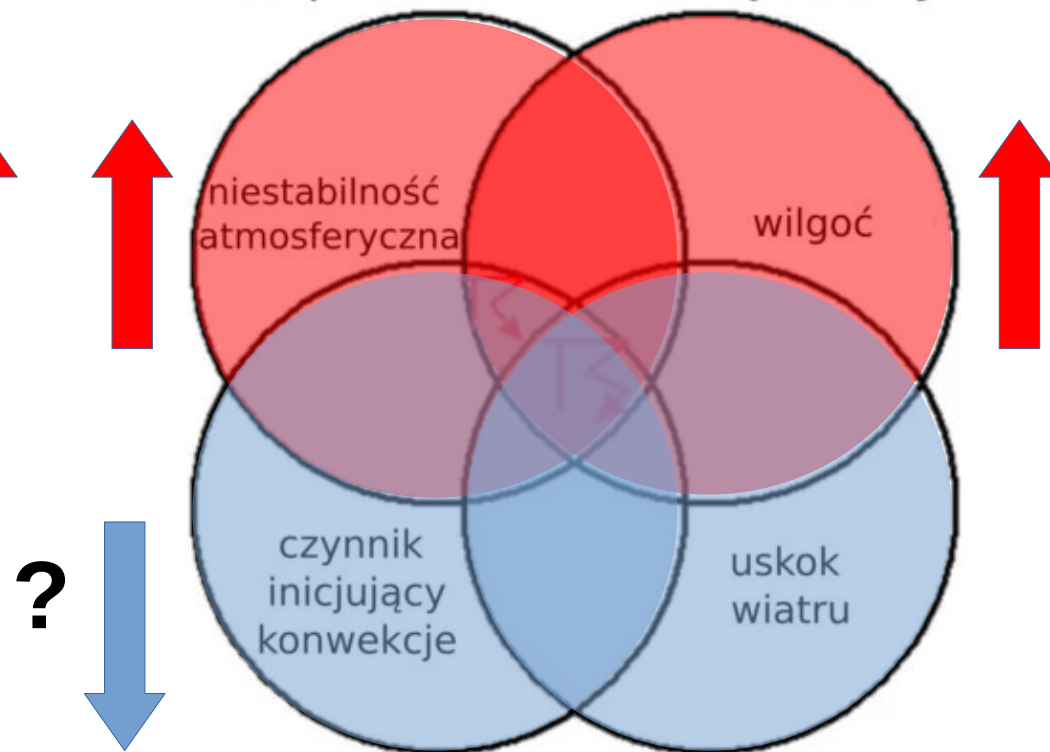


Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy

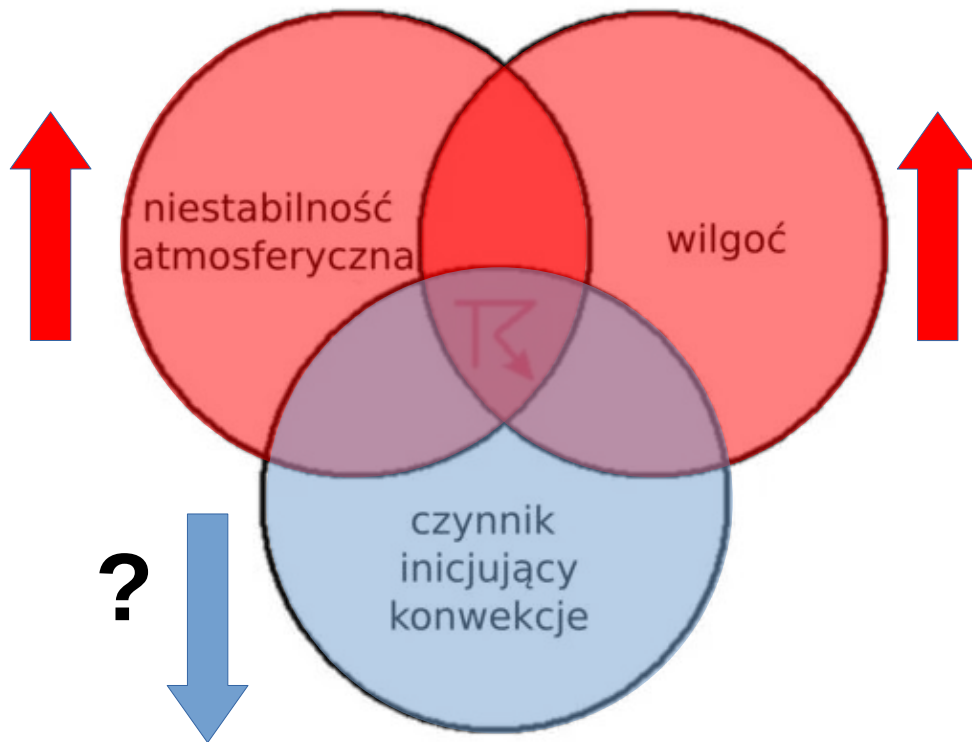


Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy

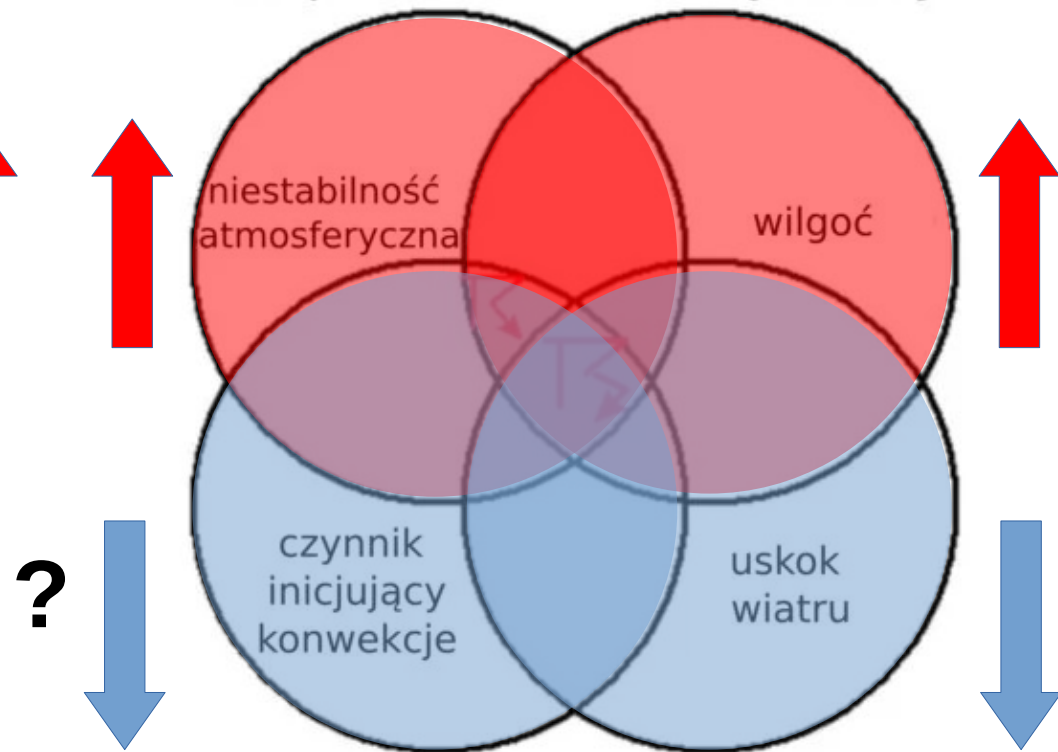


Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy



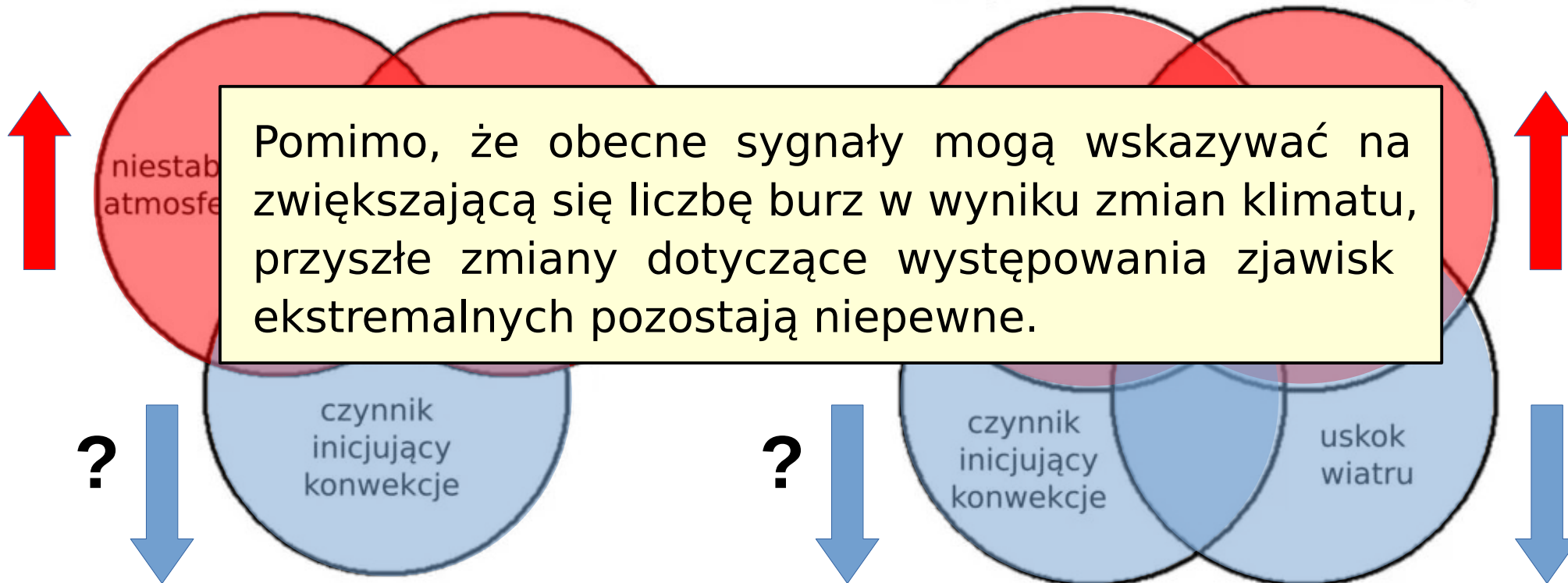
Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy



Metoda składnikowa (ang. *ingredient-based approach*)

Elementy niezbędne
do powstania burzy

Elementy niezbędne
do powstania silnej burzy



Dziękuję za uwagę!



Superkomórka burzowa z dnia 22 May 2020, która wygenerowała grad o średnicy 15 cm w miejscowości Burkburnett w Teksasie. Zdjęcie: Paulina Ćwik

Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa w ramach programu
Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą
***Spółeczna odpowiedzialność nauki - Popularyzacja nauki i
promocja sportu,***
nr projektu SONP/SP/546432/2022,
kwota dofinansowania 112 920,00 zł, całkowita wartość projektu 125
640,00 zł.



Ministerstwo
Edukacji i Nauki



UNIwersytet
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU



Wydział Nauk
Geograficznych i Geologicznych