

# CHMURY

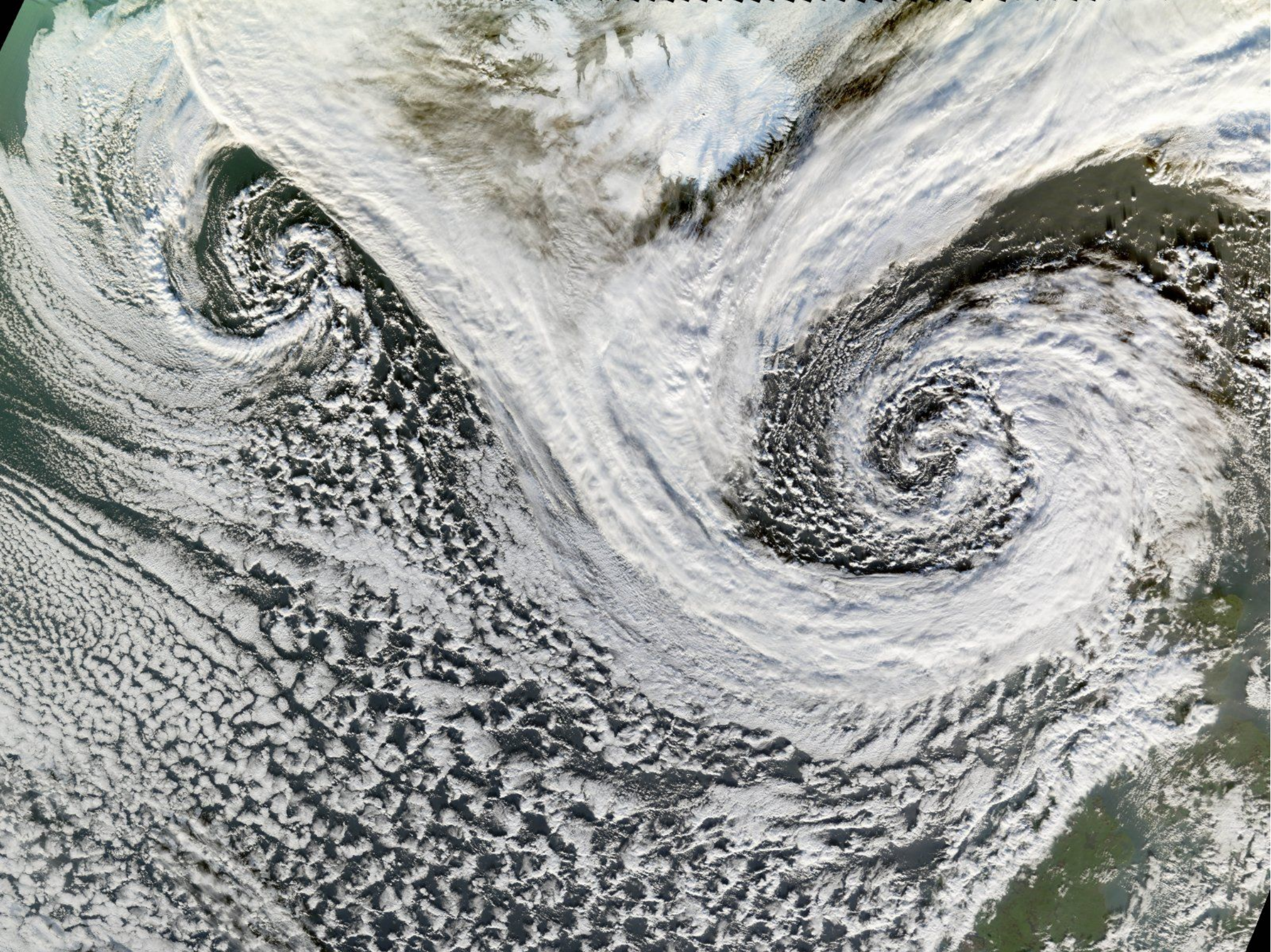
## Największa zagadka zmian klimatu

Szymon Malinowski

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Festiwal Nauki, 27 września 2014





# Czym jest chmura?

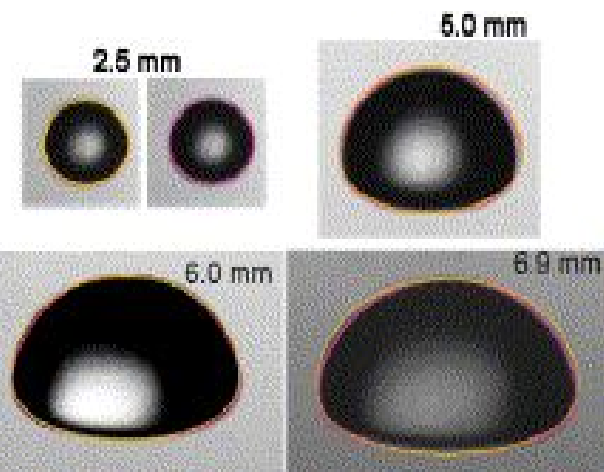
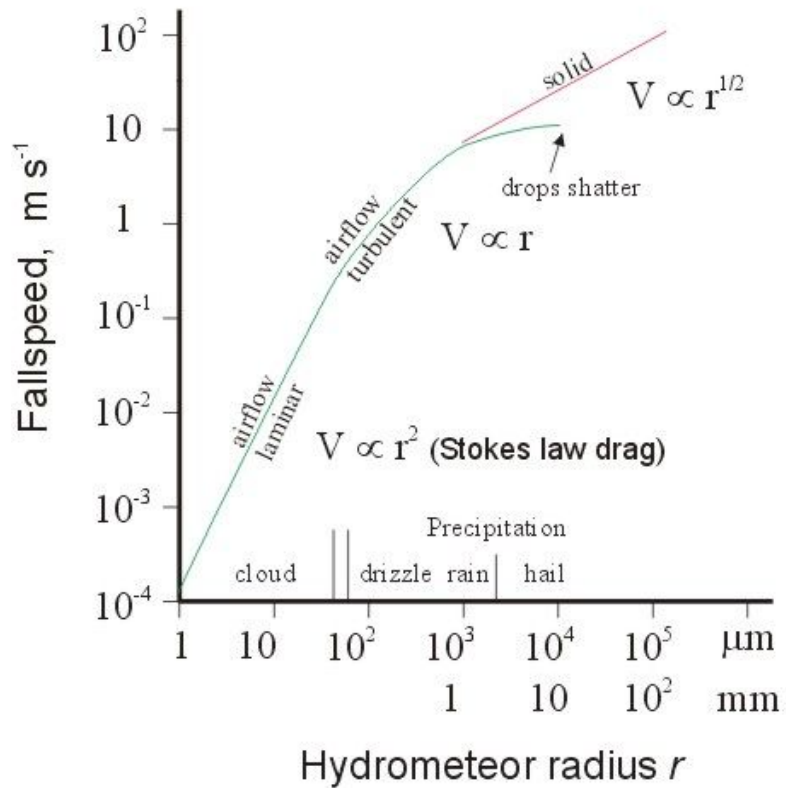
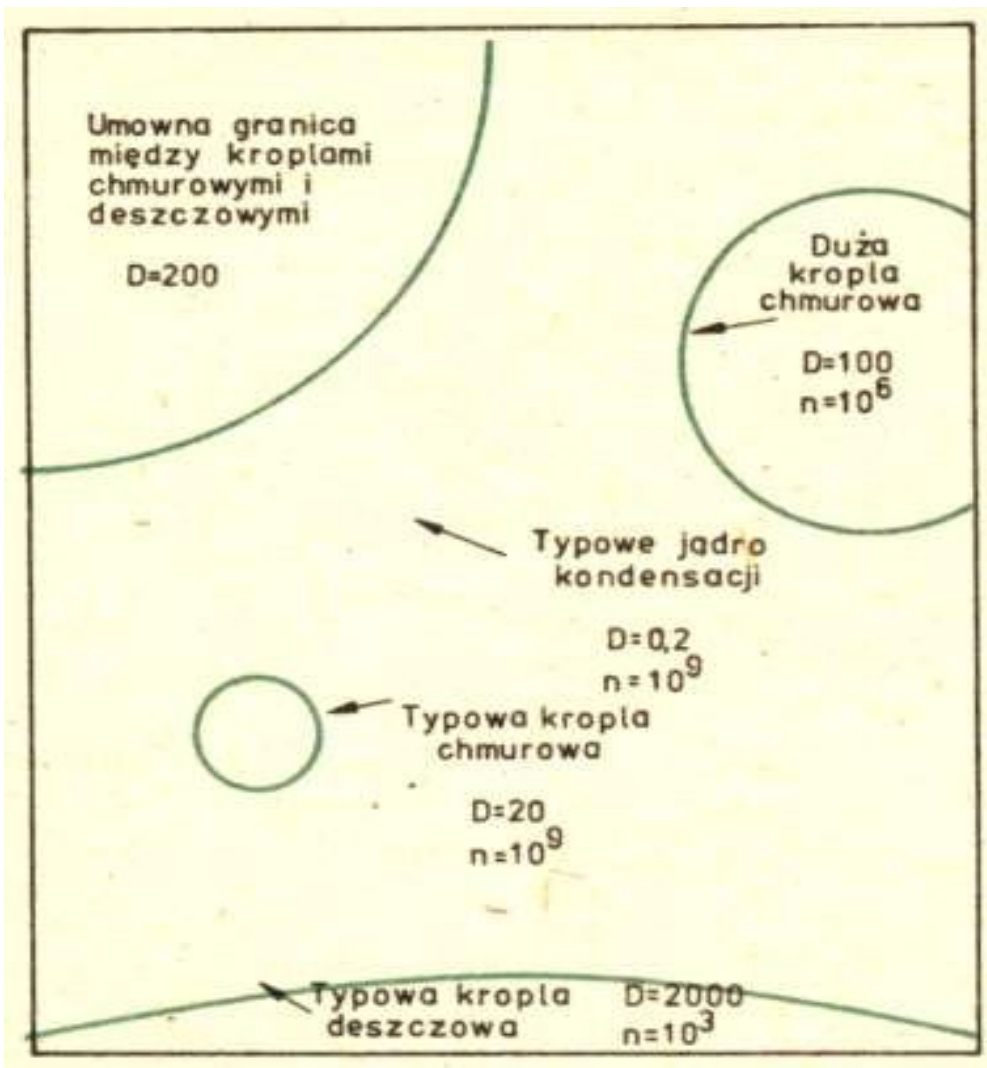
Chmury są skupiskiem bardzo drobnych (średnica 2-100 mikrometrów) kropelek wody i/lub kryształków lodu. W zależności od składu mówimy o chmurach:

– ciepłych – składających się wyłącznie z kropelek wody (ang. warm clouds),

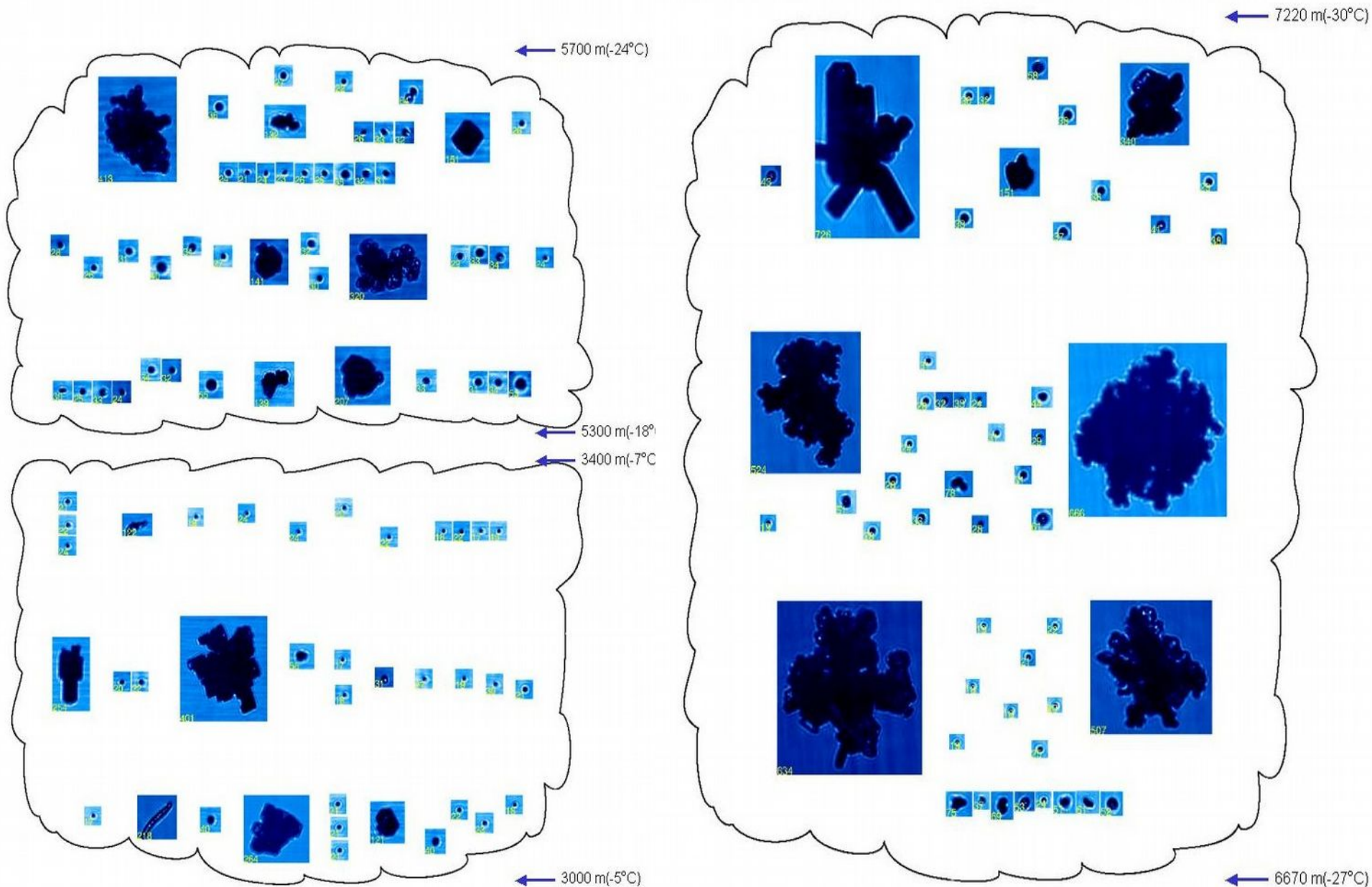
– lodowych – składających się wyłącznie z kryształków lodu (ang. ice clouds)

mieszanych – zawierających zarówno krople jak i kryształki (ang. mixed phase clouds).

# CLOUD-PARTICLE FALLSPEEDS

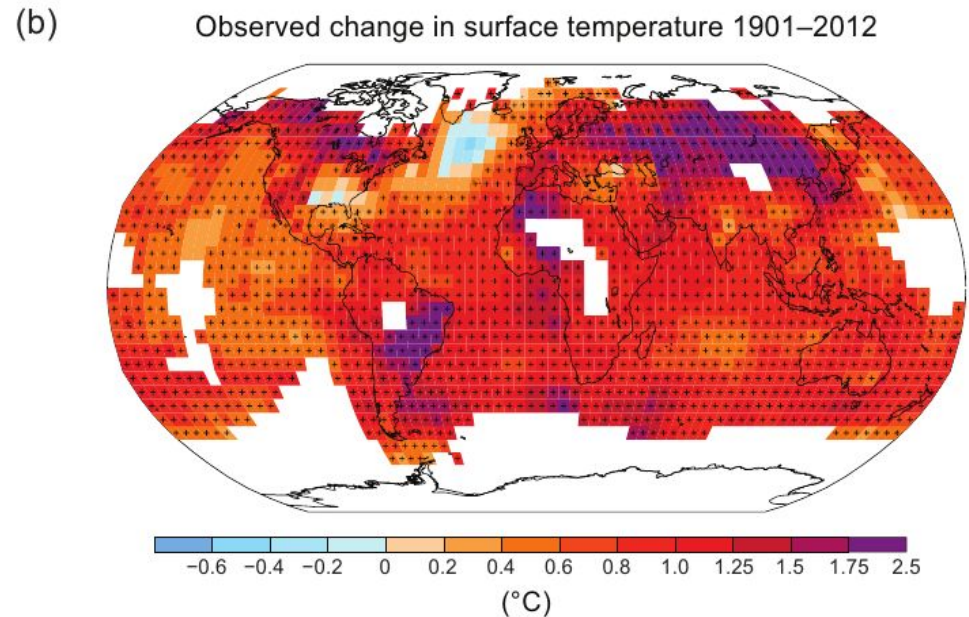
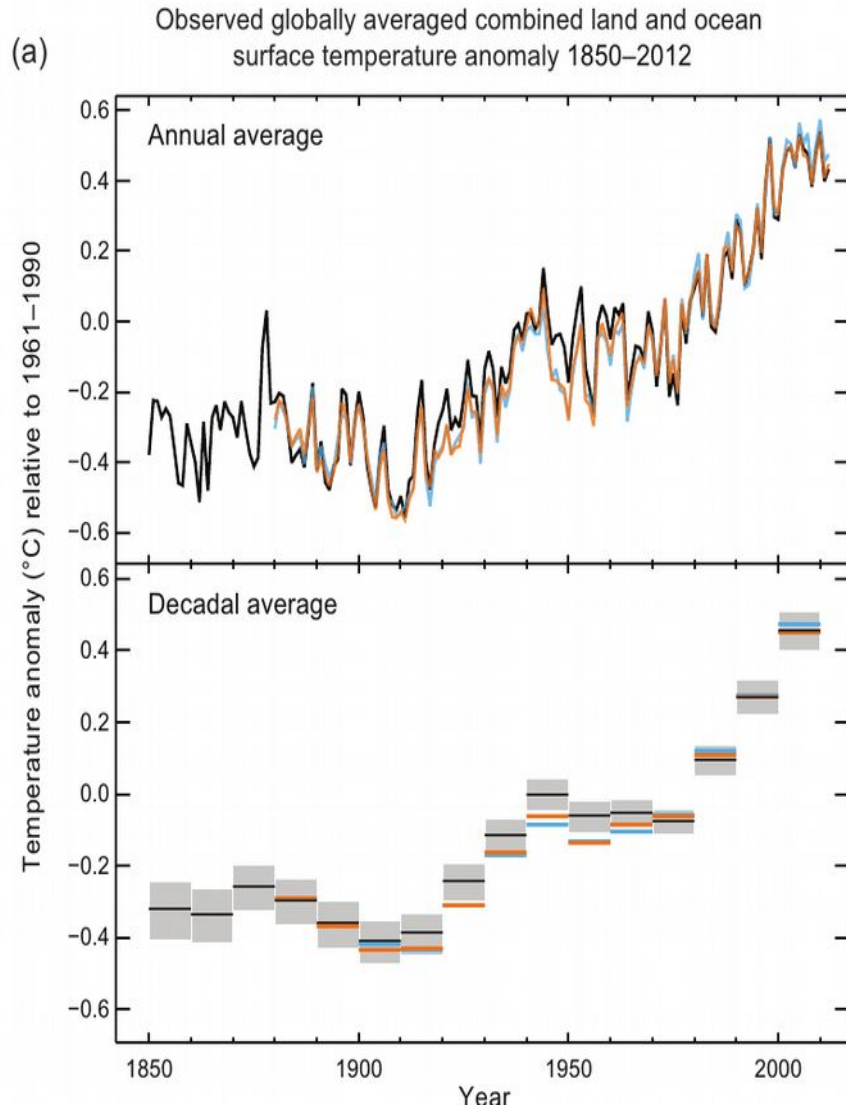


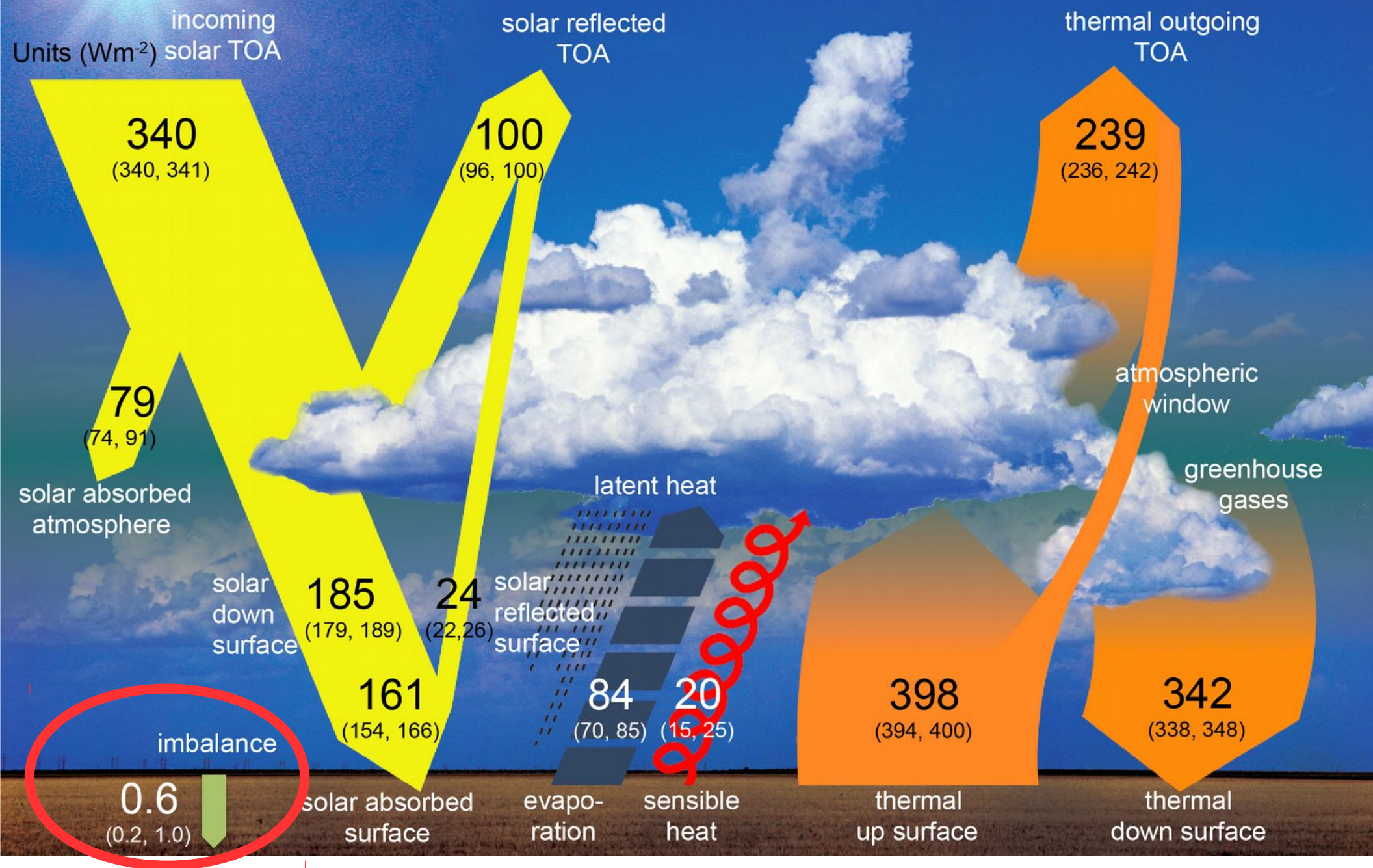
KROPLE  
CHMUROWE I  
OPADOWE



Cząstki chmurowe na różnych wysokościach zaobserwowane w warunkach naturalnych przyrządem CPI (Cloud Particle Imager, SPEC Inc.)

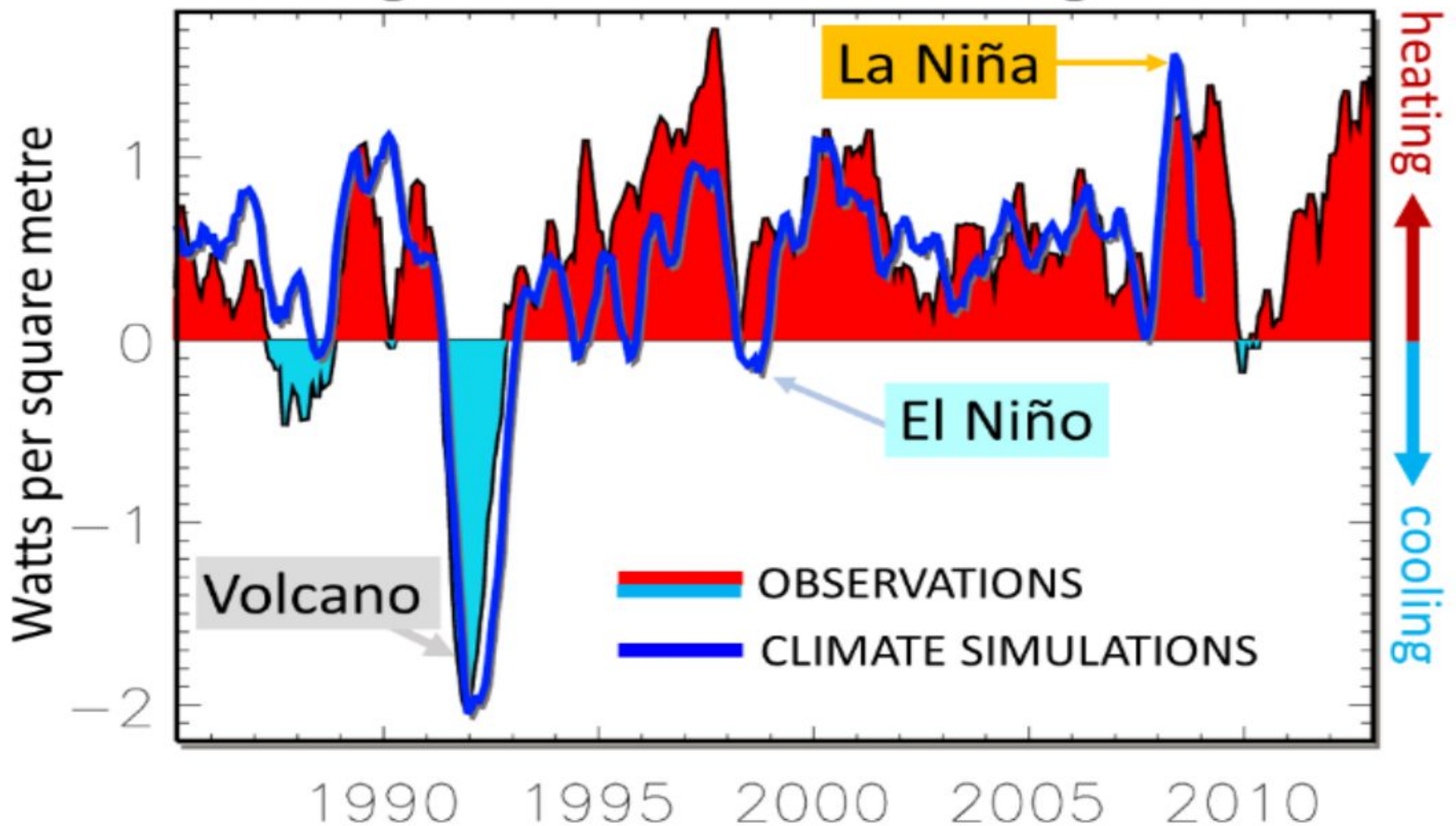
Aktualna zmiana klimatu:  
globalne ocieplenie, czyli wzrost temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi wskutek wzrostu efektu cieplarnianego spowodowanego antropogeniczną emisją gazów cieplarnianych.





Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w  $\text{W}/\text{m}^2$ .  
 W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

# Changes in Earth's heating rate



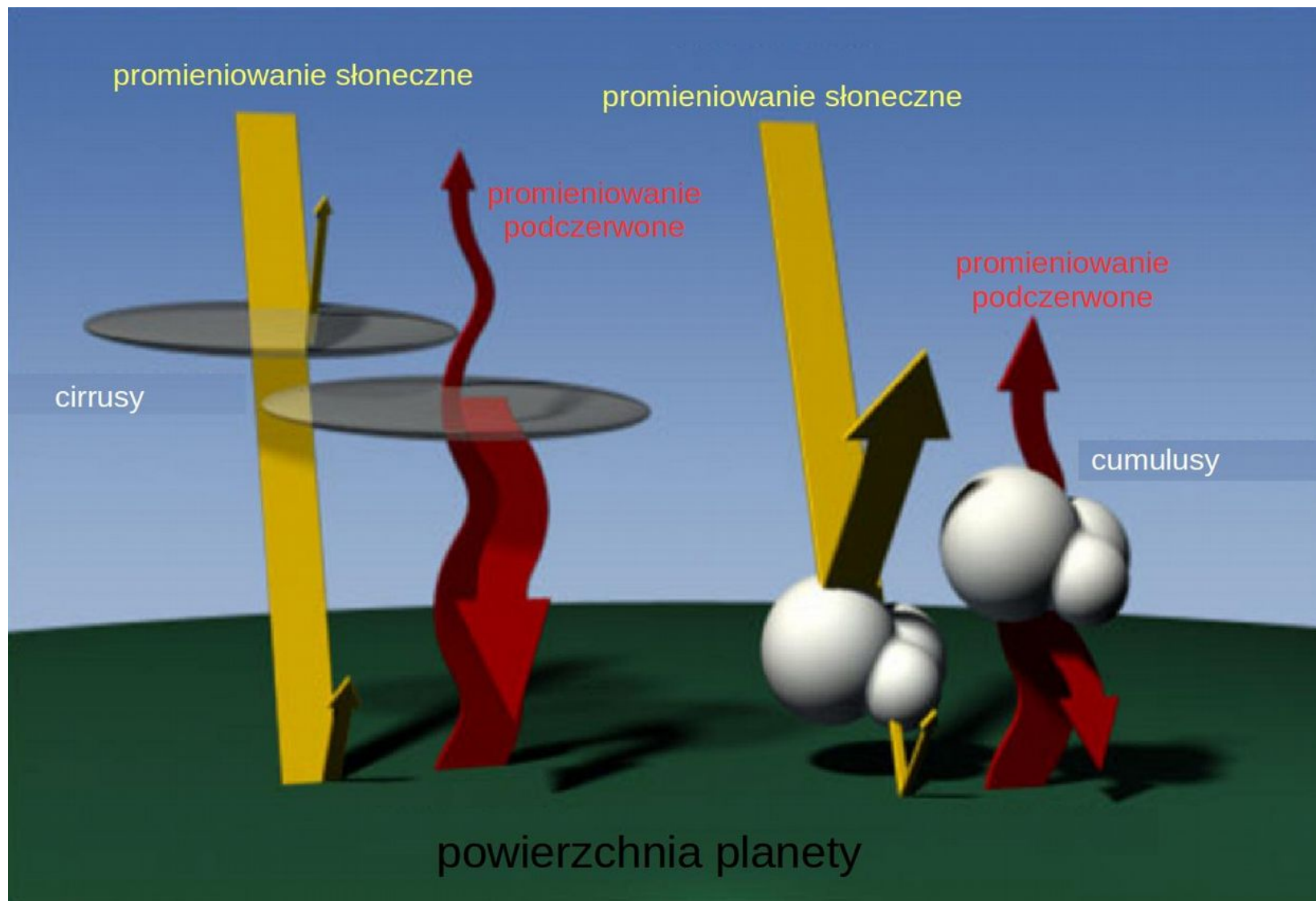
Allan, R. P., C. Liu, N. G. Loeb, M. D. Palmer, M. Roberts, D. Smith, and P.-L. Vidale (2014), Changes in global net radiative imbalance 1985–2012, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5588–5597, doi:10.1002/2014GL060962.



Chmury składają się z kropelek i kryształków wody, najważniejszej substancji cieplarnianej w atmosferze. Chmury odbijają promieniowanie słoneczne.

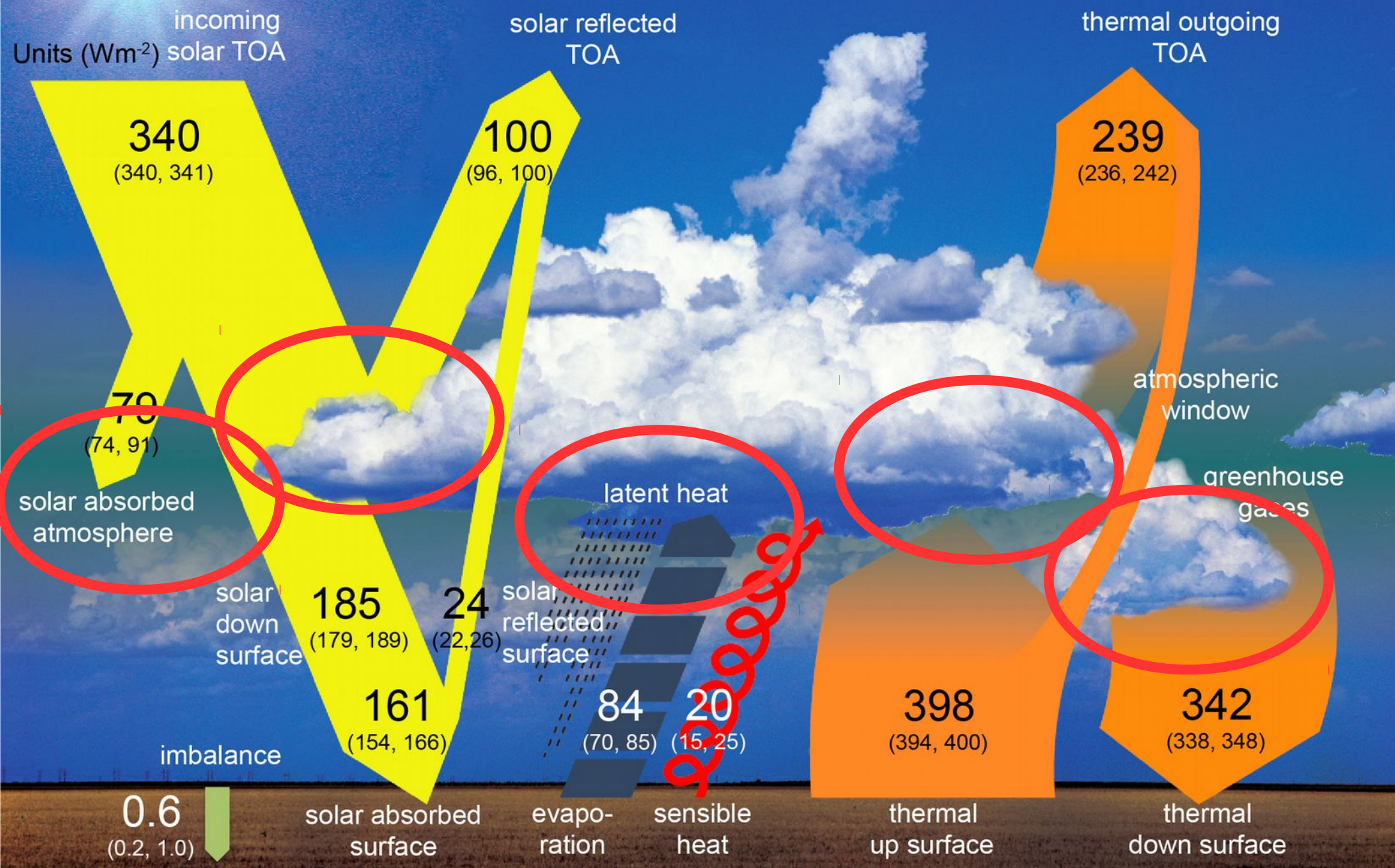
Czy, przy wzroście temperatury powierzchni i związanego z tym wzrostu parowania przybywa chmur? Czy przeważa wzrost efektu cieplarnianego (ogrzewanie) czy wzrost albedo (chłodzenie)?



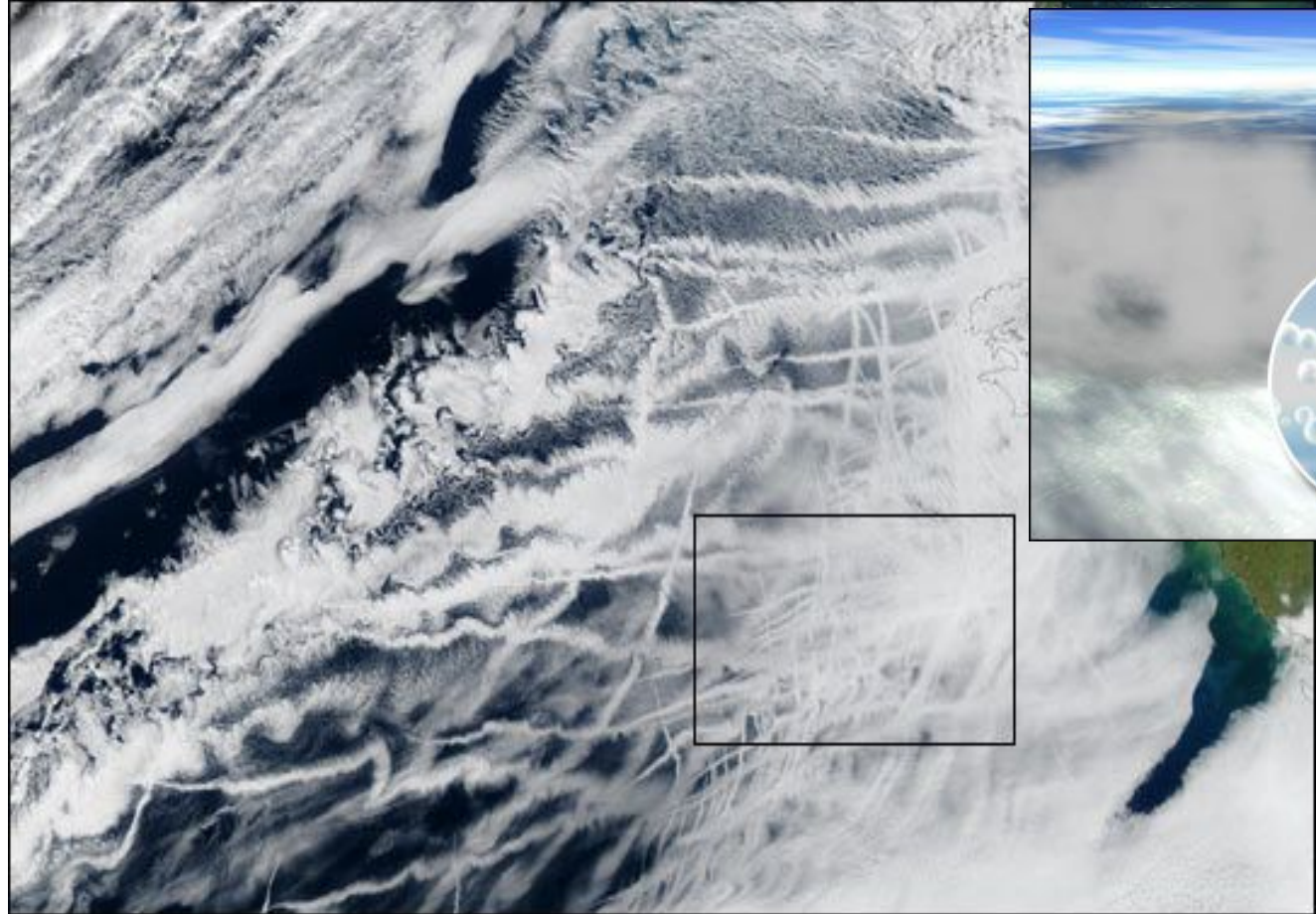


Rola chmur w klimacie (w uproszczeniu):

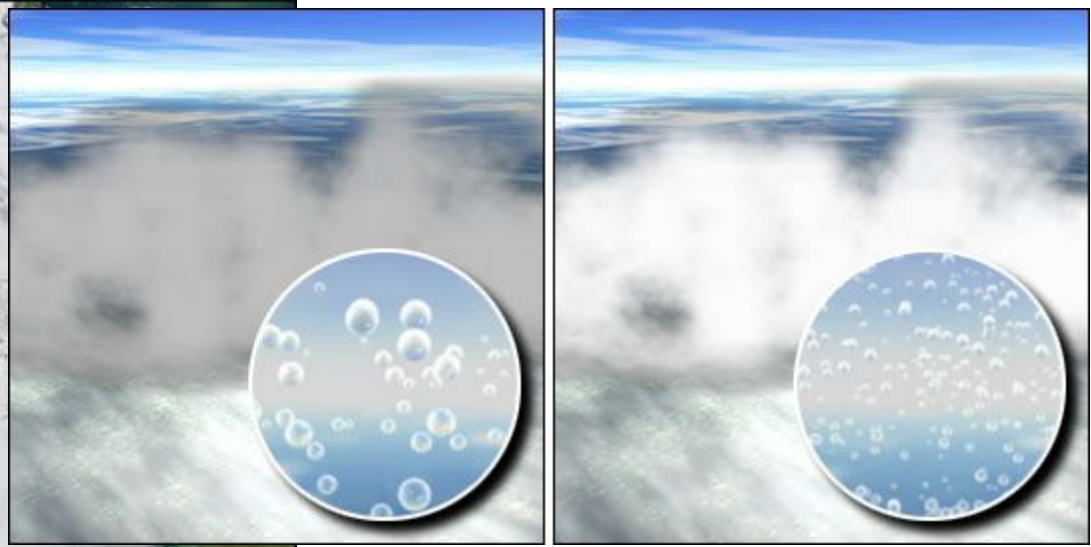
- chmury wysokie (lewa część rysunku) przepuszczają większość padającego na nie promieniowania słonecznego (żółte strzałki), ale zatrzymują wypromieniowywane przez Ziemię promieniowanie podczerwone (czerwone strzałki), powodując wzrost średnich temperatur,
- chmury niskie (prawa część rysunku) silnie rozpraszają wstecz promieniowanie słoneczne, powodując spadek średnich temperatur powierzchni Ziemi.



Chmury wpływają na niemal wszystkie elementy bilansu radiacyjnego.

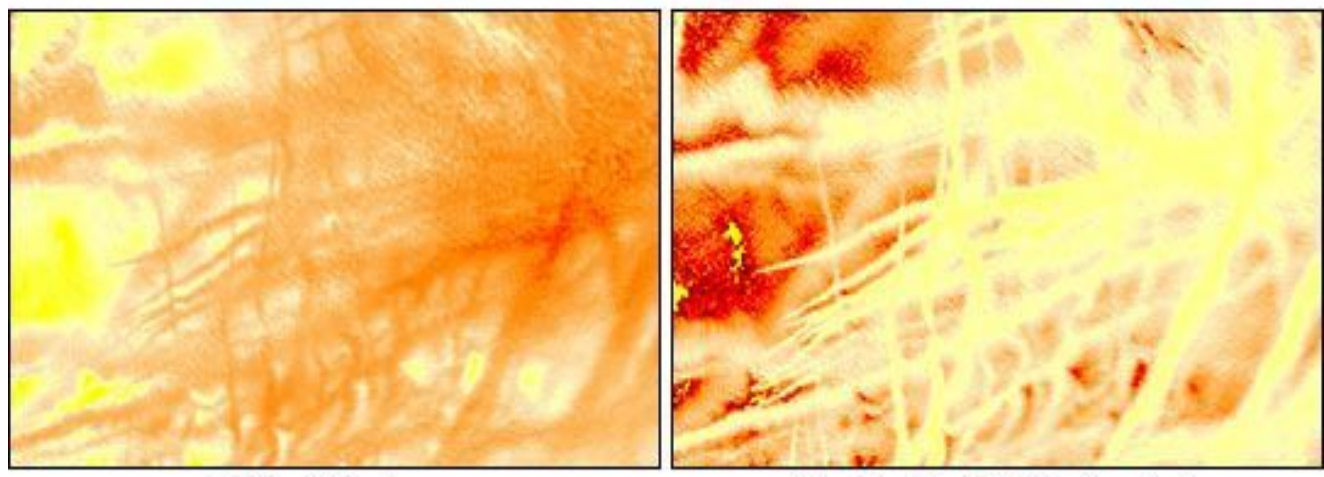


True Color



Wpływ aerozolu na budowę chmur (rozmiar kropelek) i w konsekwencji na ich własności radiacyjne:

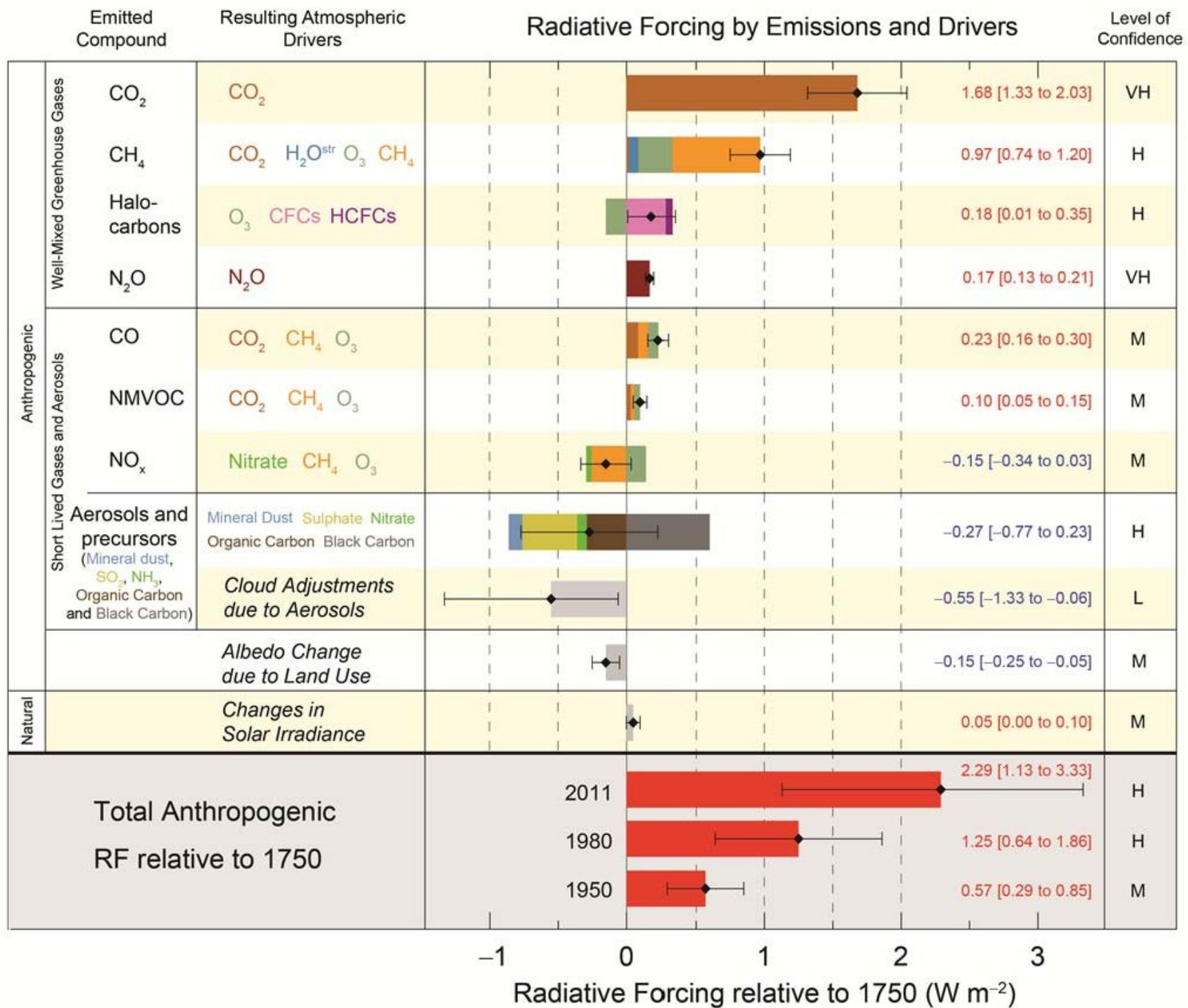
- tzw. pośrednie efekty aerozolowe:
- pierwszy (albedo chmur)
  - drugi (czas życia chmur).

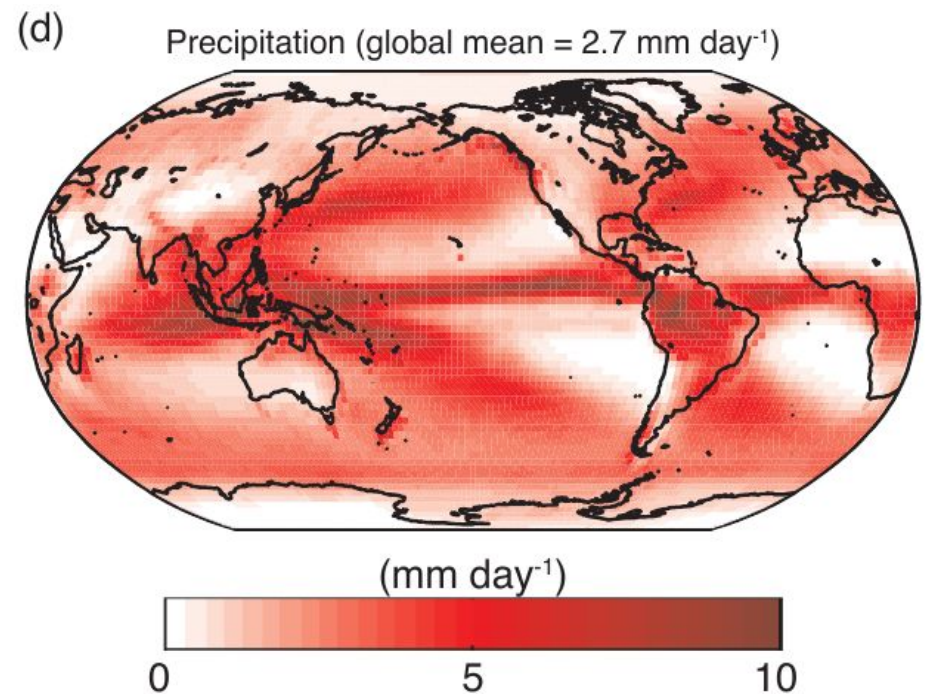
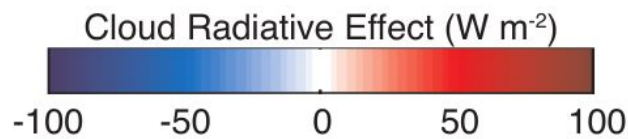
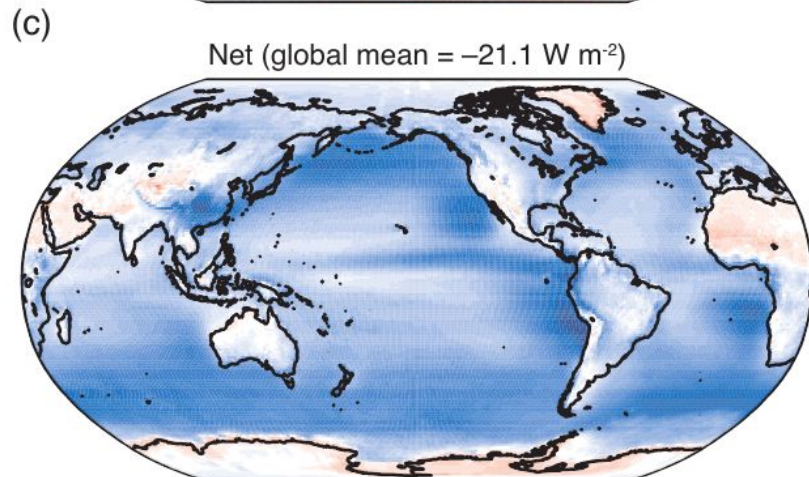
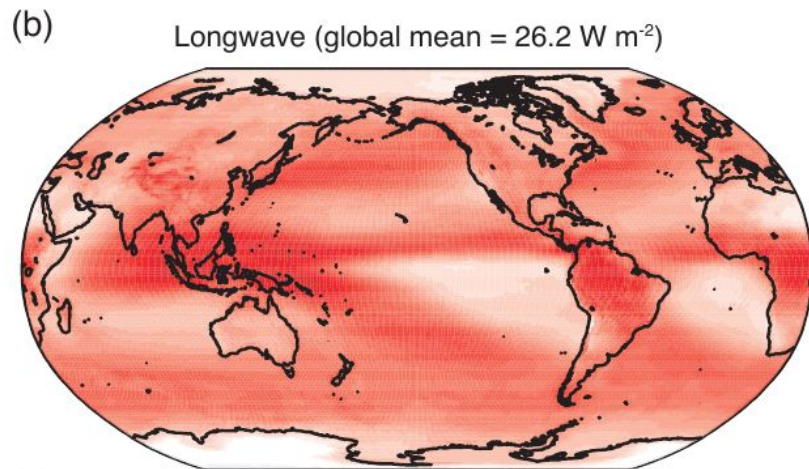
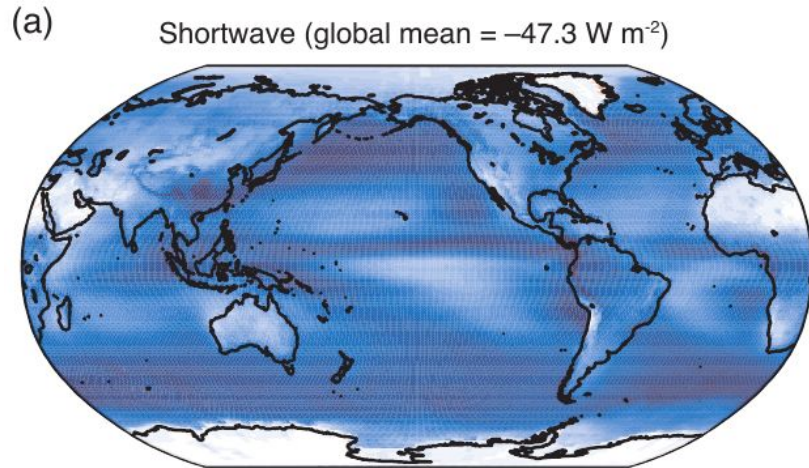


Optical Thickness

Effective Particle Radius (μm)







Rozkład średniorocznych chmurowych efektów radiacyjnych na górnej granicy atmosfery:

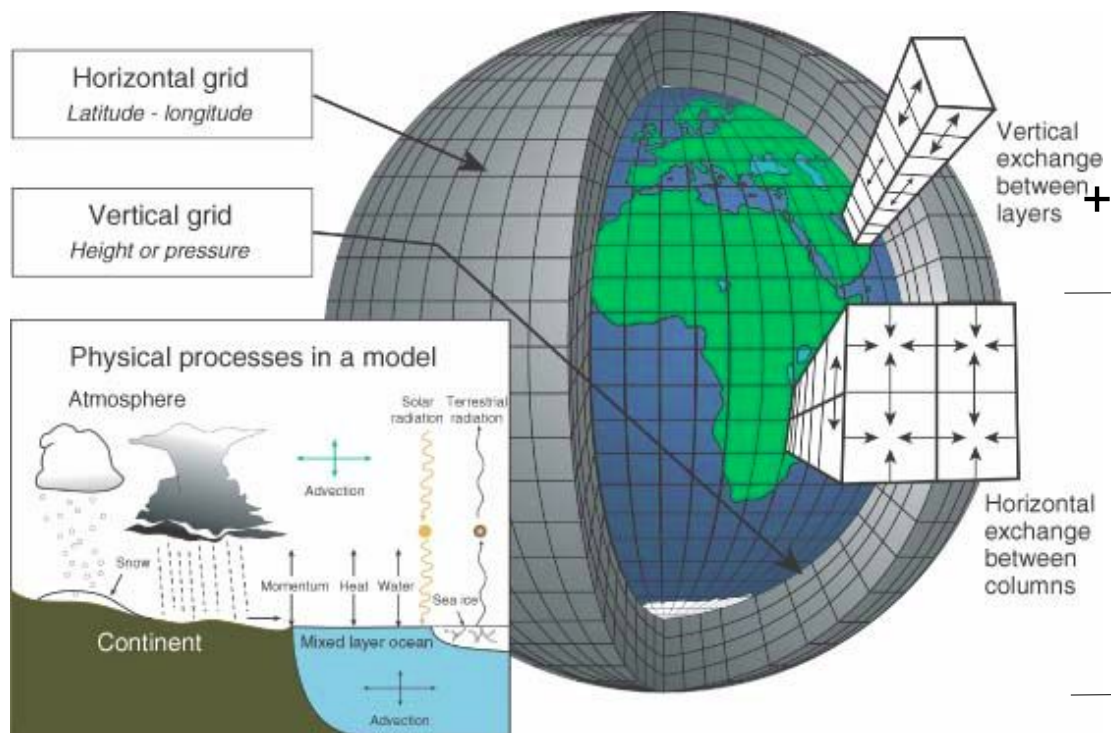
- (a) promieniowanie krótkofalowe,
- (b) promieniowanie długofalowe
- (c) efekt netto.

Na podstawie danych z lat 2001–2011 z radiometru Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) i zestawu danych Energy Balanced and Filled (EBAF) Ed2.6r.

(d) Opady (1981–2000 z zestawu danych GPCP wersja 2.2.

Ekstremalny sposób badania klimatu to budowa wirtualnej planety (modelu systemu klimatycznego) dzięki znajomości praw fizyki:

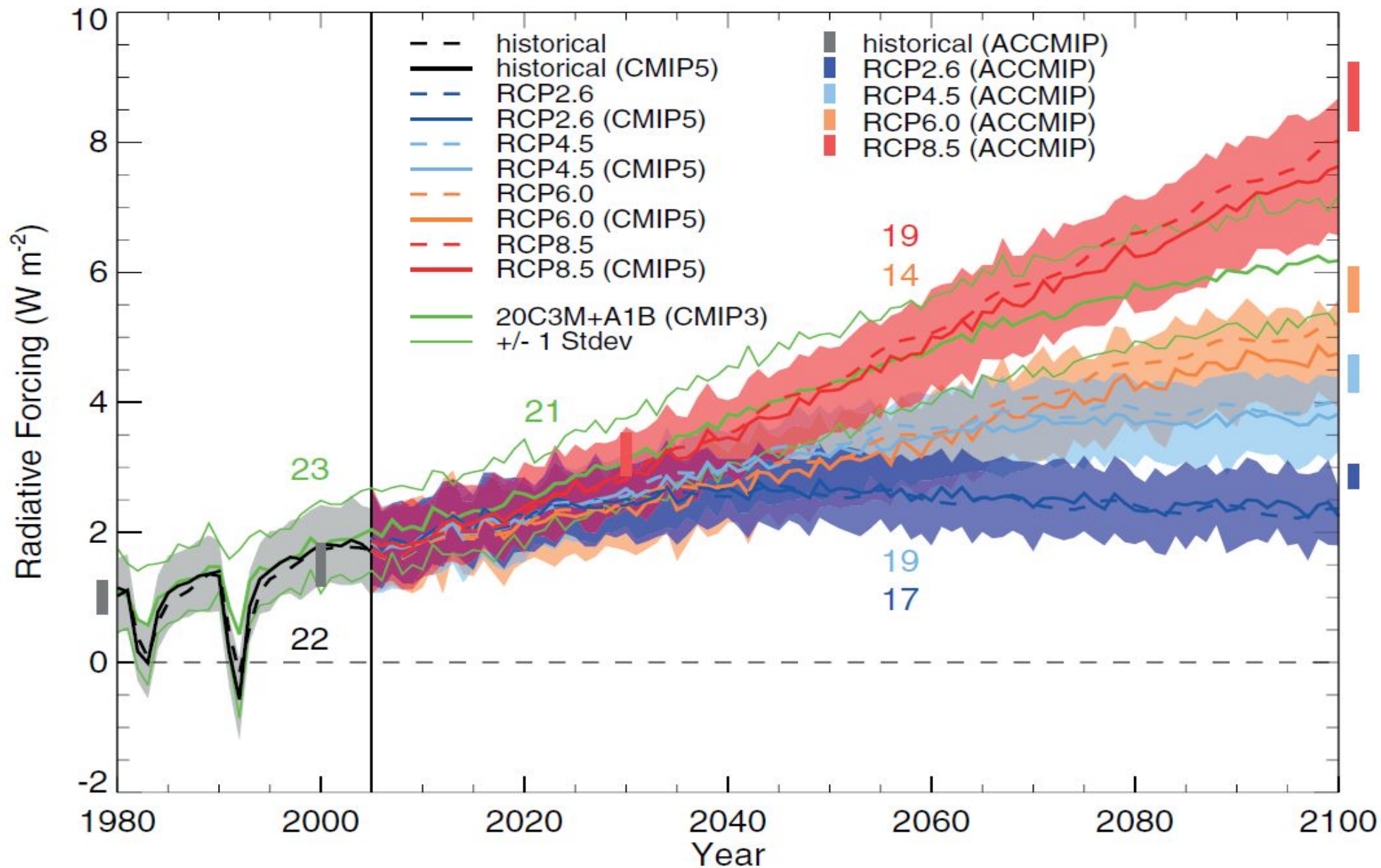
równania hydrodynamiki  
równania termodynamiki  
prawa transferu radiacyjnego  
własności składników atmosfery  
promieniowanie słoneczne  
oddziaływanie z podłożem  
przemiany chemiczne



układ równań modelu

- \* „zakłęcie” w kod numeryczny
- \* uwzględnienie danych
- \* wielki superkomputer

wirtualna rzeczywistość, w której możemy symulować mechanizmy klimatyczne i związki przyczynowo-skutkowe.

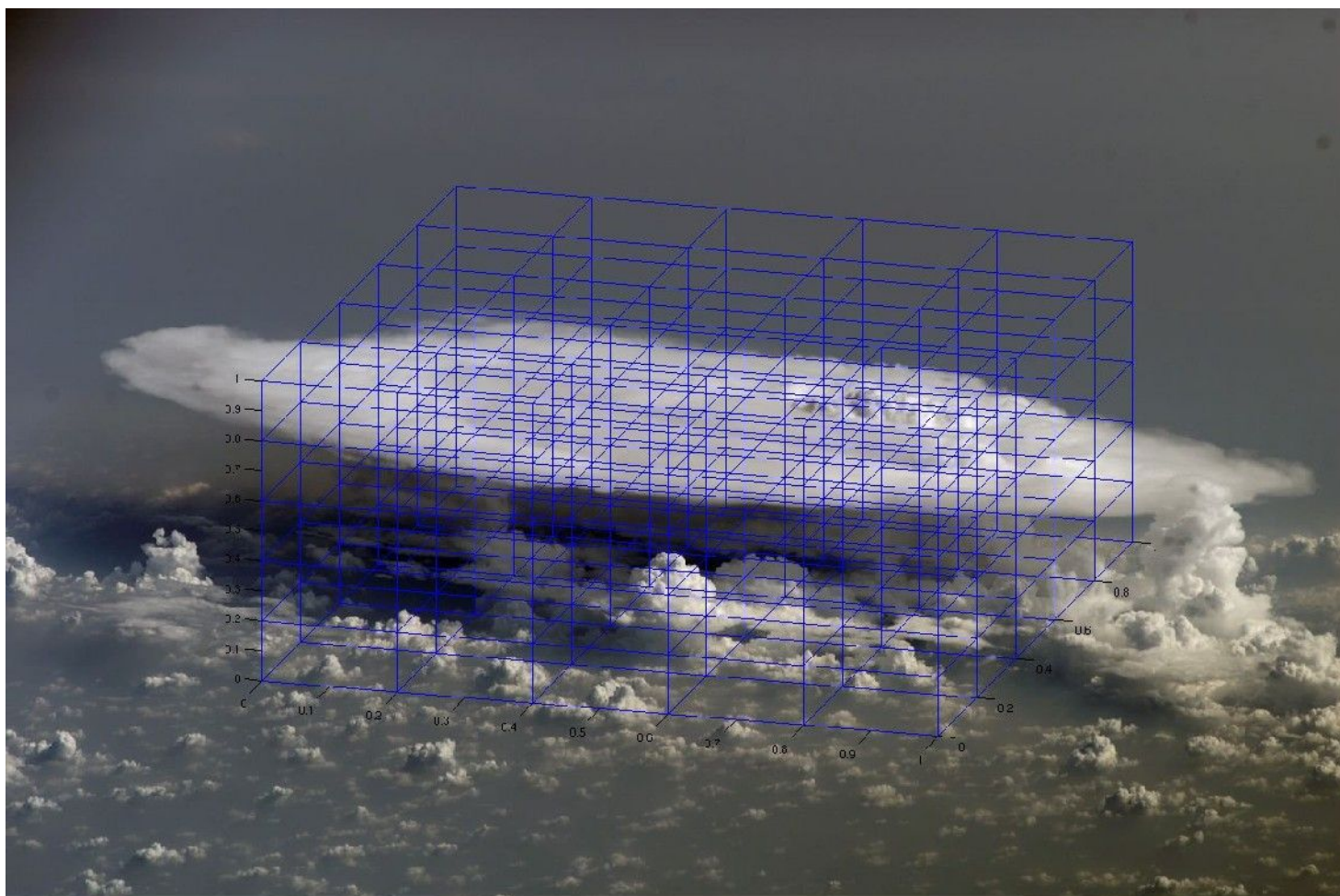


Zmiany wymuszania radiacyjnego (zmian w bilansie energetycznym) w symulacjach numerycznych wieloma modelami dla różnych scenariuszy emisji. Niepewność związana jest głównie z tym jak reprezentujemy w modelach klimatu chmury.

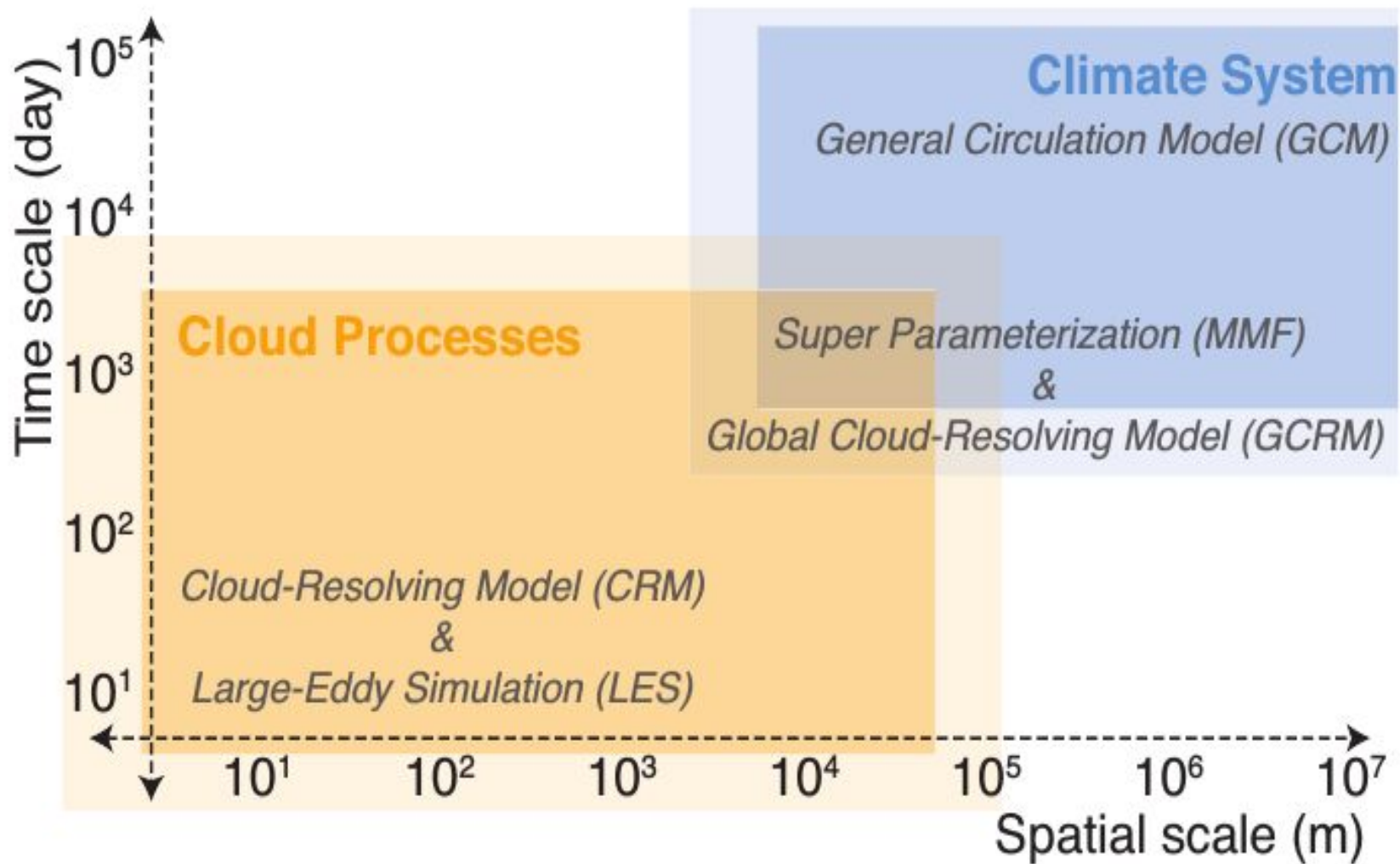


Jakie problemy napotyka modelowanie prognozy pogody i klimatu?

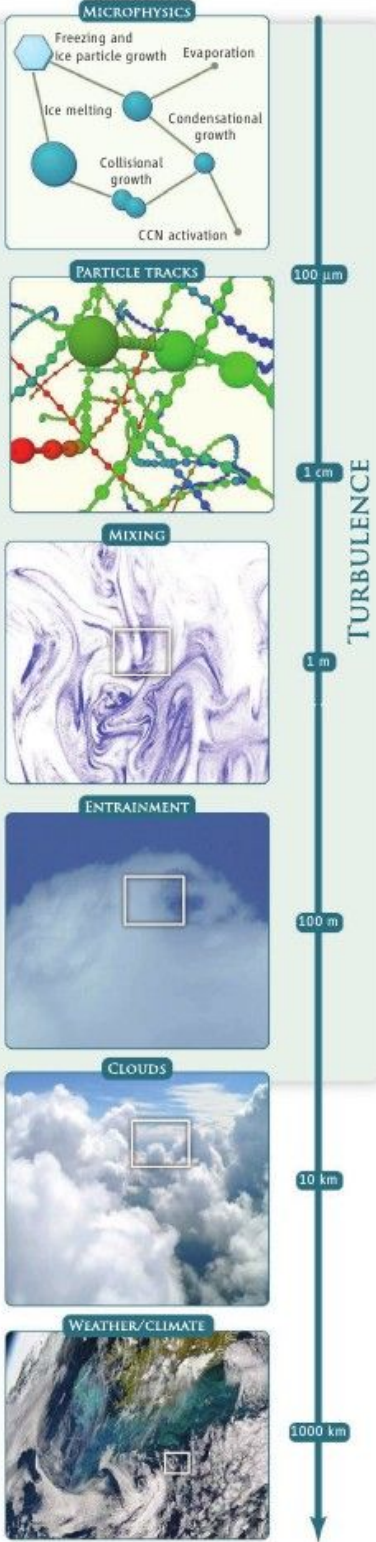
Najważniejszy to wielkoskalowość przepływów w atmosferze i oceanie i konieczność parametryzacji procesów podskalowych (o rozmiarach mniejszych niż oczko siatki i zachodzących szybciej niż krok czasowy obliczeń)



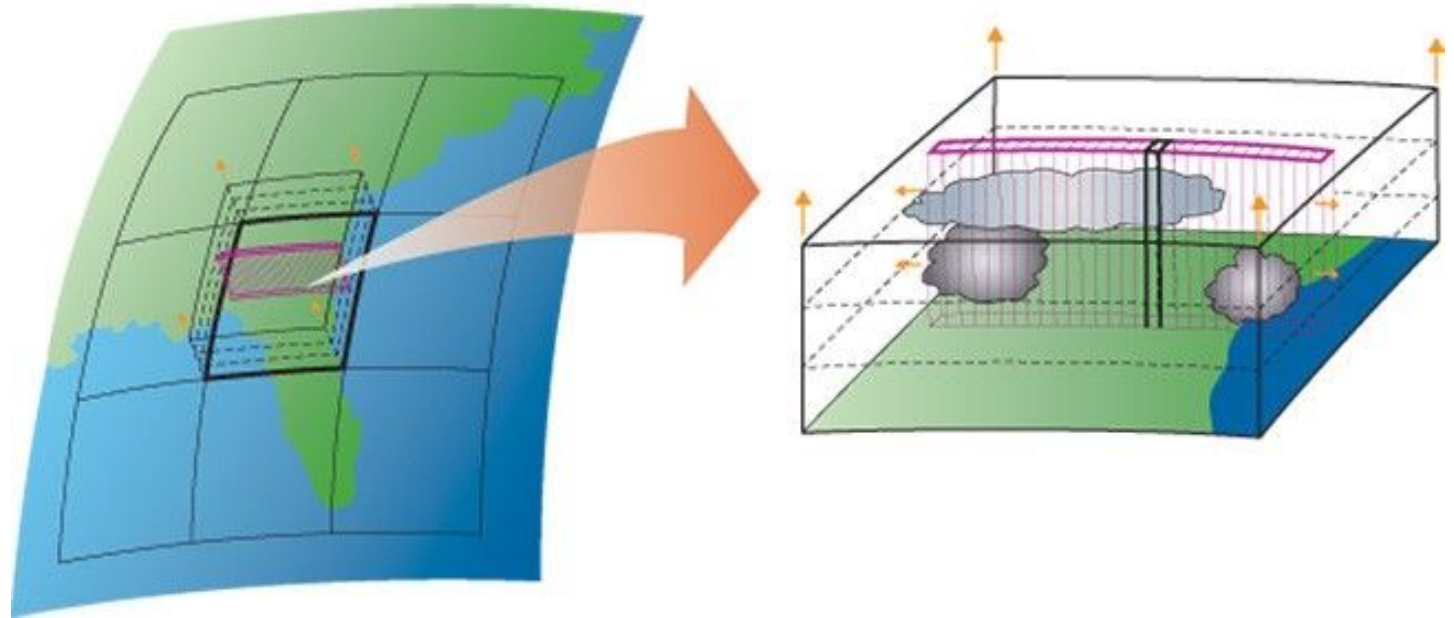
ISS016E027426



Strategie modelowania procesów atmosferycznych. Pokazano procesy o różnych skalach przestrzennych i czasowych związanych z modelowaniem klimatu (obszar niebieski) i chmur (obszar pomarańczowy).



Jak sobie radzimy z problemami?  
 „Multiscale modeling” - modelowanie wieloskalowe,  
 superparametryzacje, GIGA-LES, ILES,  
 explicit cloud-resolving....



Bodenschatz, E., S.P. Malinowski, R.A. Shaw, F. Stratmann, 2010: Can We Understand Clouds without Turbulence? *Science*, **327**, 970 – 971.

Randall D.A, Khairoutdinov M, Arakawa A, Grabowski W.W., 2003: Breaking the cloud parameterization deadlock . *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **84**, 1547-1564.

I wiele wiele innych.....

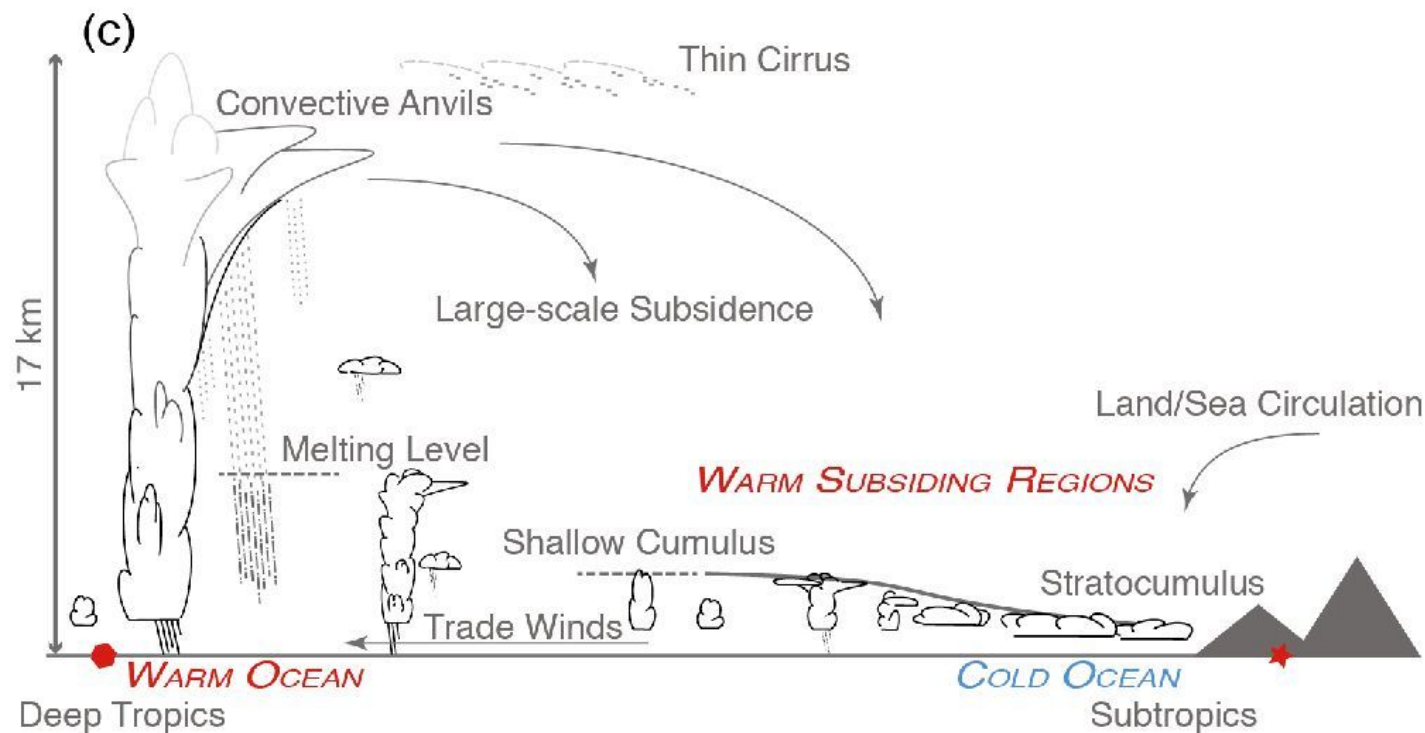
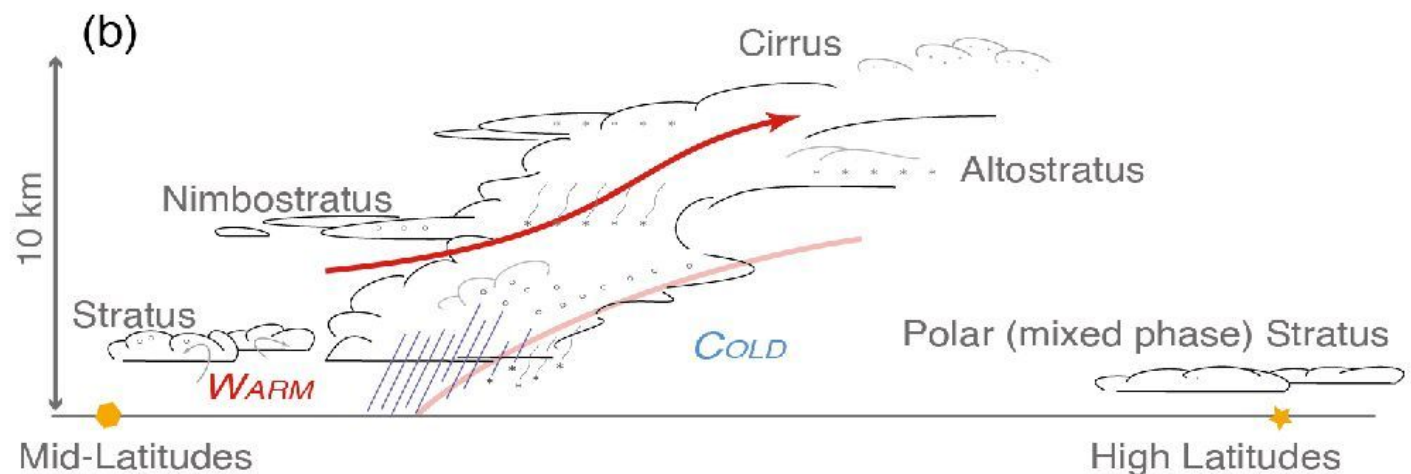
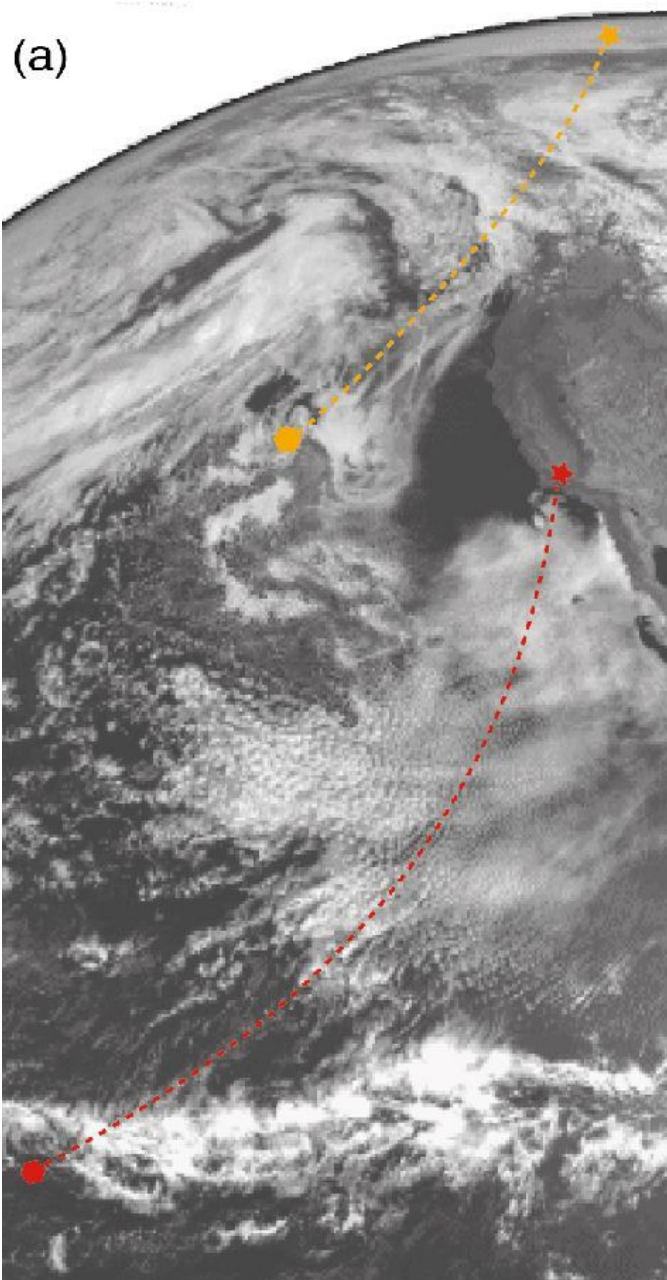
## Przykład zastosowania symulacji w skalach chmur do badania ich wpływu na procesy klimatyczne.

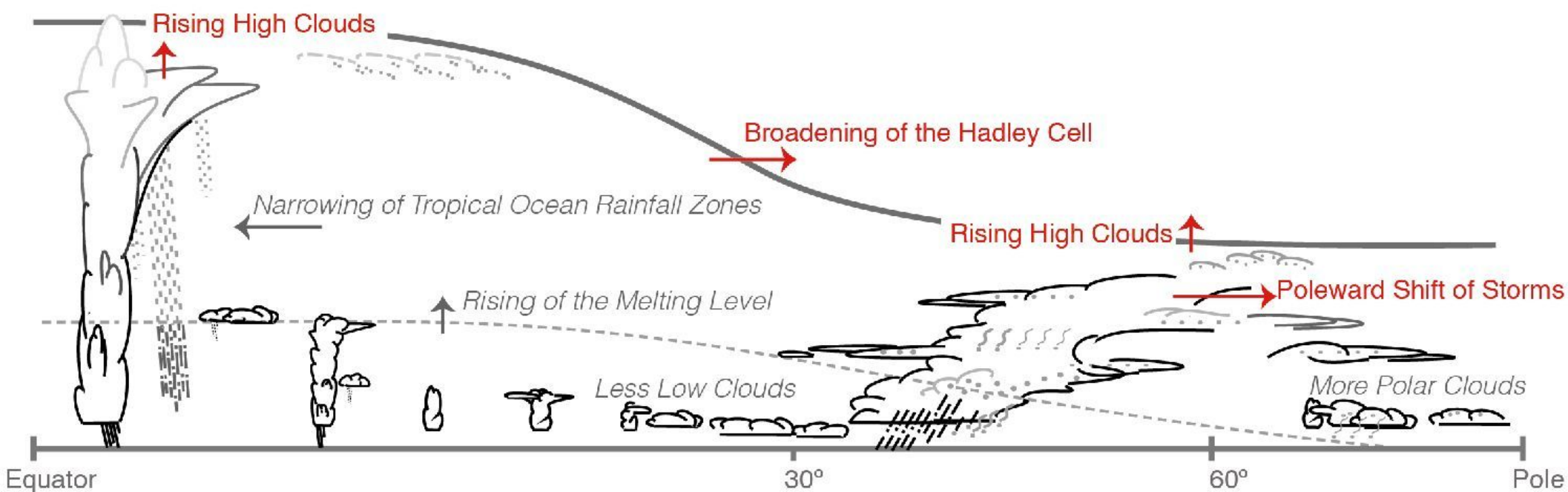


Wykształcenie się głębokiej (8-16 km, zależnie od szerokości geograficznej) konwekcji oznacza, że para wodna zabierana z warstwy granicznej atmosfery (poniżej ok. 2 km) i zużywana do tworzenia chmury powraca na powierzchnię Ziemi w postaci opadów.

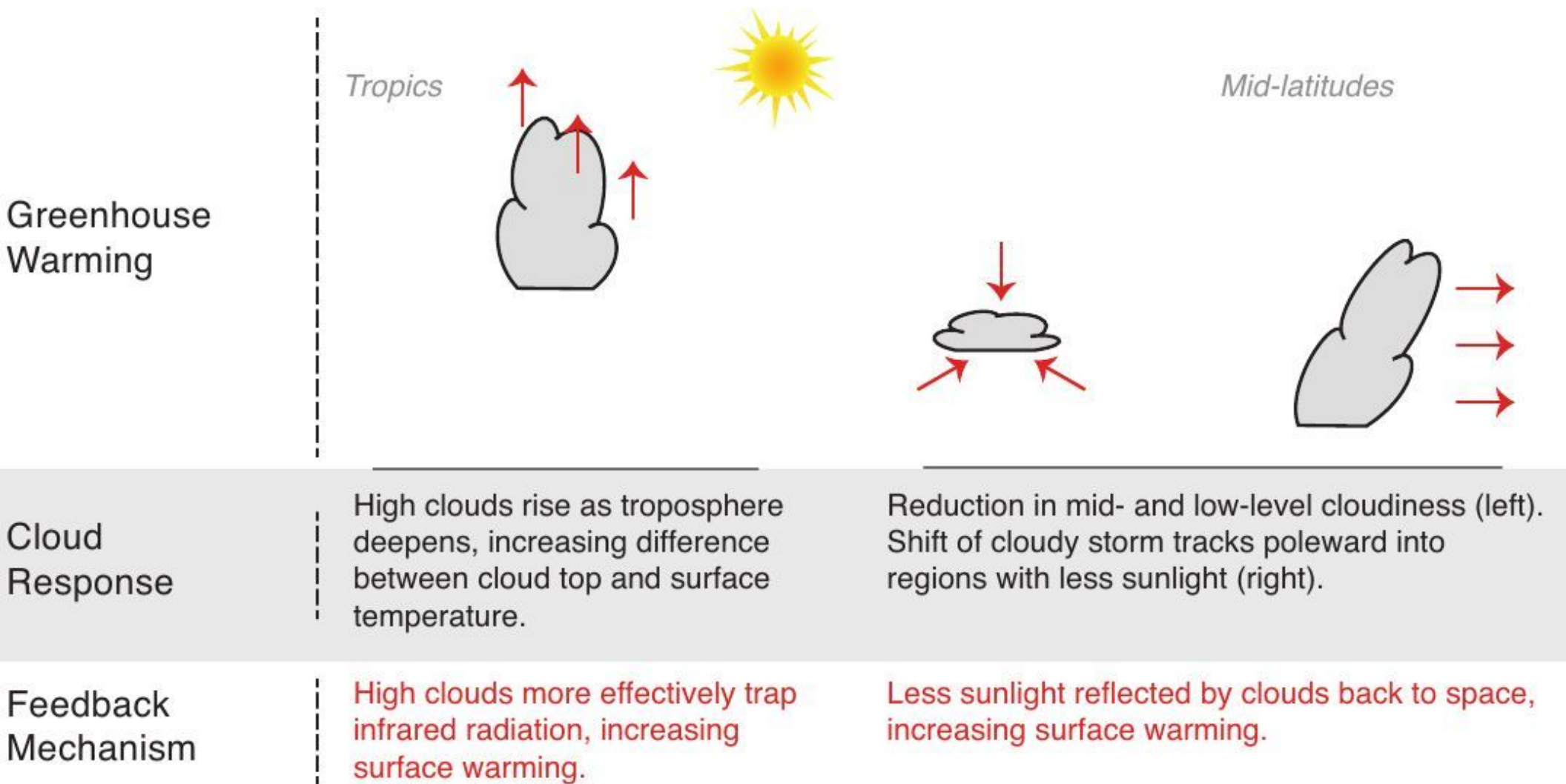
Mieszanie może zapobiegać powstawaniu rozbudowanych w pionie chmur a w rezultacie – opadów. W efekcie w „wysuszonej” warstwie granicznej chmur ubywa a przybywa chmur na piętrach średnich i wysokich (2-8 km).

Chmury i aerozole, a ściślej cykl hydrologiczny wpływają nie tylko na strumienie radiacyjne, ale i na dynamikę atmosfery i oceanu.

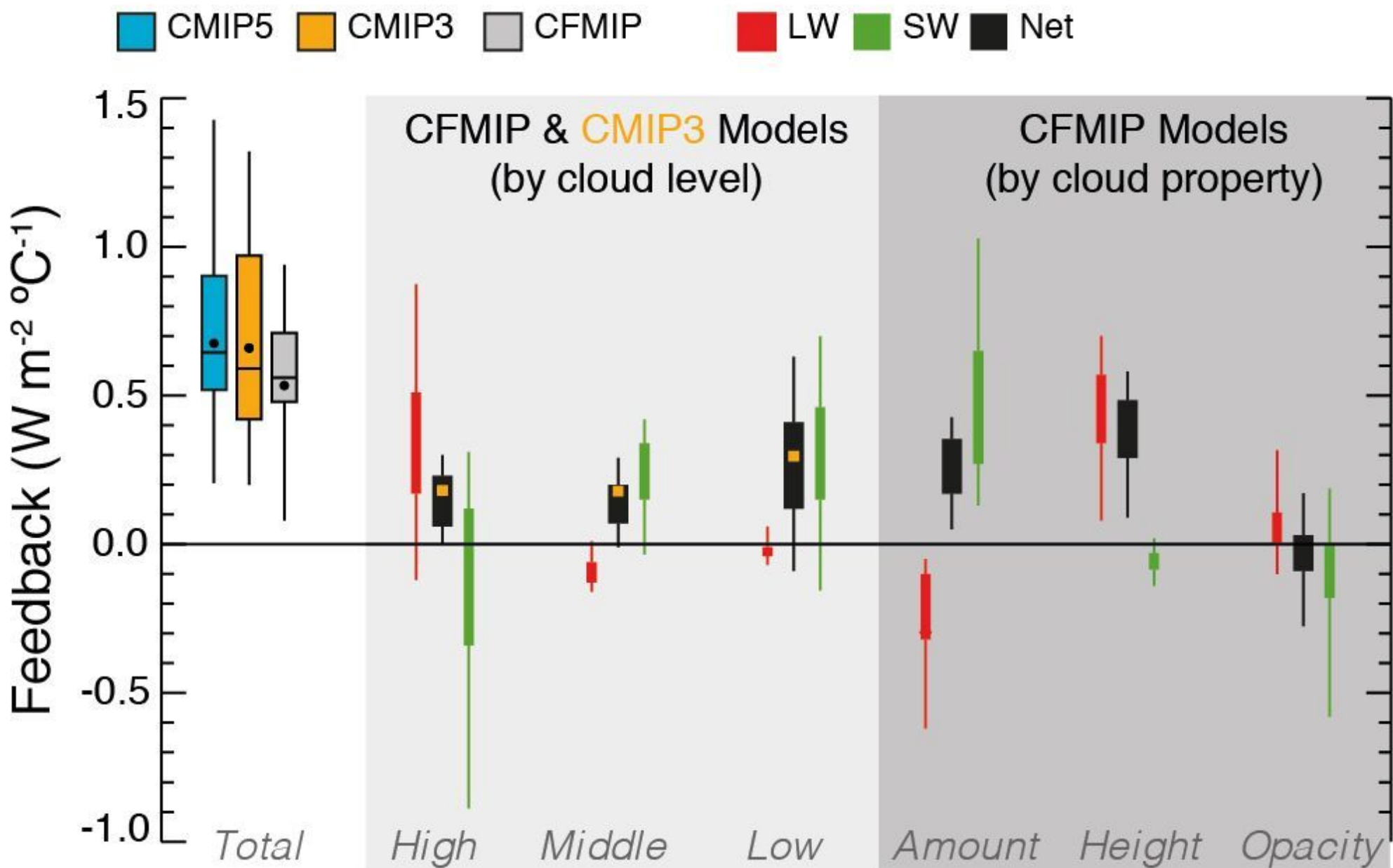




Zmiany w strukturze i dynamice atmosfery związane ze zmianami zachmurzenia na ocieplającej się Ziemi.



Zmiany w zachmurzeniu ocieplającej się planety – schematycznie.

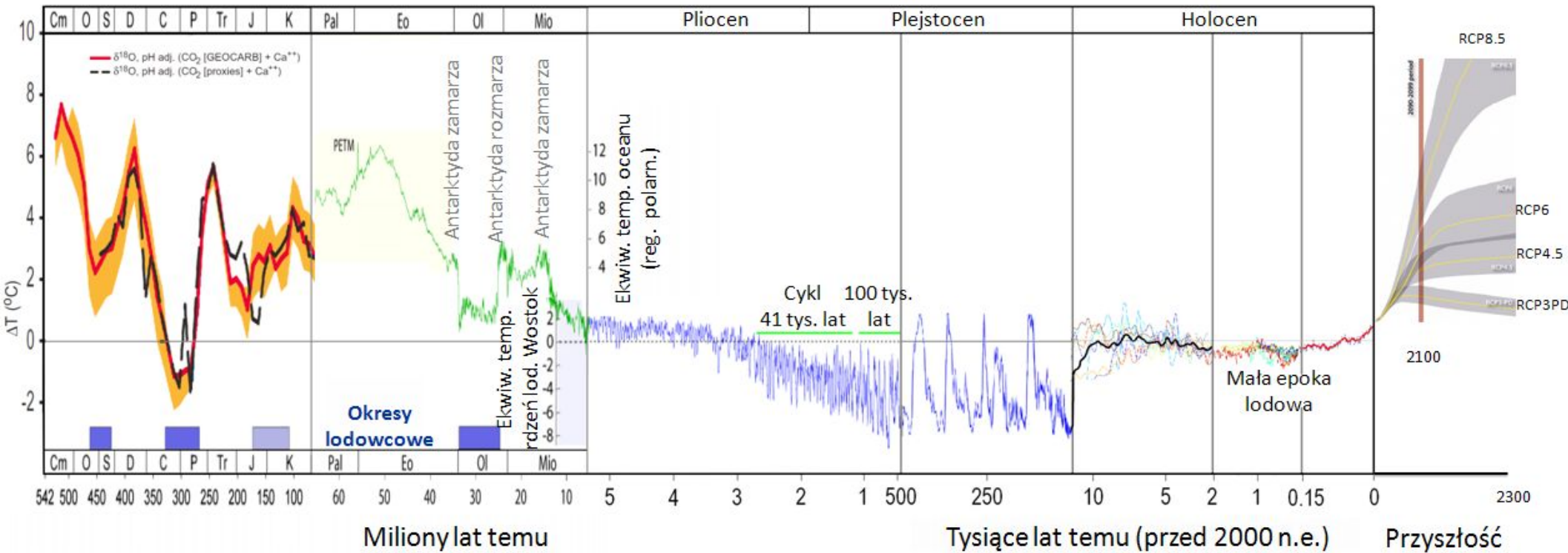


Efekty sprzężeń związanych z chmurami wskutek z zmian koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze w symulacjach modelami klimatu .



# Historyczne i przyszłe zmiany klimatu

## Zmiany średniej temperatury powierzchni Ziemi



Złożenie danych paleoklimatycznych, pomiarowych i projekcji klimatu.

A co jeśli zaczną gwałtownie narastać niekorzystne procesy związane ze wzrostem temperatury... geoinżynieria... Solar Radiation Management (SRM)



CARBON DIOXIDE REMOVAL

- A** Ocean Fertilisation
- B** Alkalinity Addition To The Ocean
- C** Accelerated Weathering
- D** Direct Air Capture
- E** Biomass Energy With Carbon Capture And Storage
- F** Afforestation

SOLAR RADIATION MANAGEMENT

- G** Deployment Of Space Mirrors
- H** Stratospheric Aerosol Injection
- I** Marine Cloud Brightening
- J** Ocean Brightening With Microbubbles
- K** Crop Brightening
- L** Whitening Rooftops

Philip J Rasch, Simone Tilmes, Richard P Turco, Alan Robock, Luke Oman,  
Chih-Chieh (Jack) Chen, Georgiy L Stenchikov, Rolando R Garcia  
DOI: 10.1098/rsta.2008.0131, published 13 November 2008



Cloud brightening –  
rozjaśnianie niskich  
chmur nad oceanem  
przez emisje aerozolu  
soli morskiej.

Latham, J. (1990). "Control of global warming"  
Nature 347 (6291): 339–340.  
doi:10.1038/347339b0

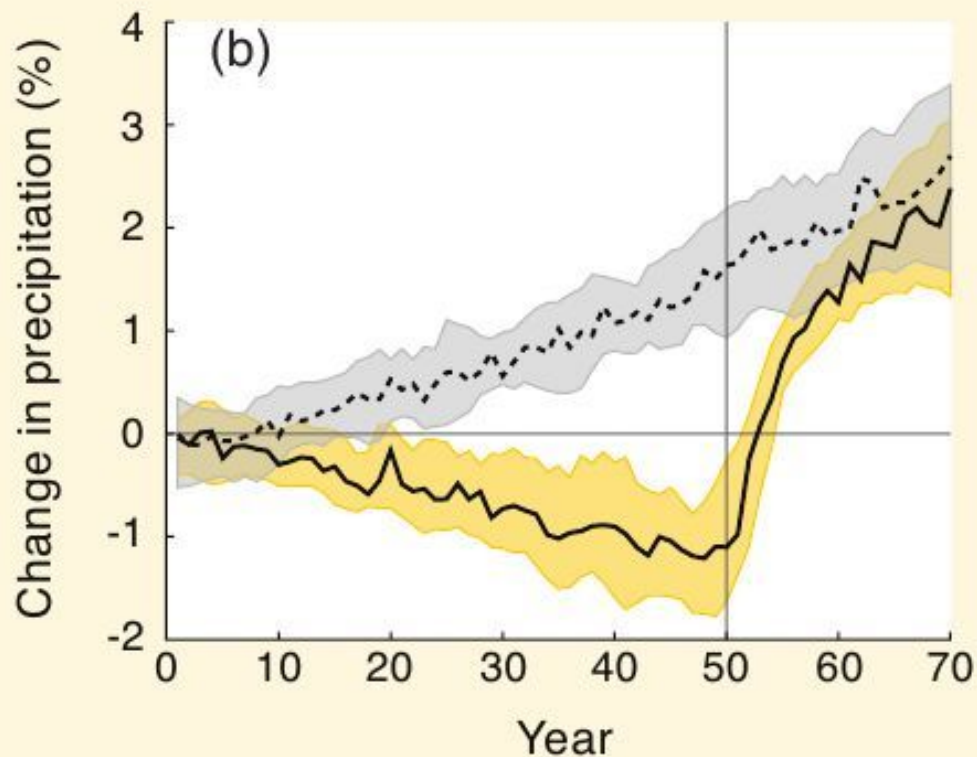
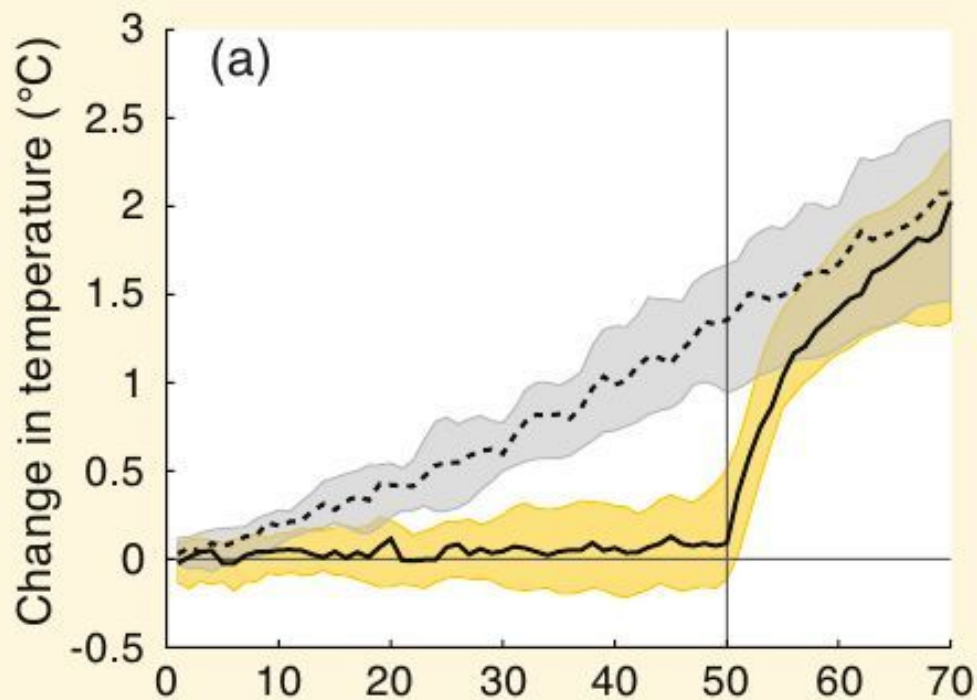
Latham, J., P.J. Rasch, C.C.Chen, L. Kettles, A.  
Gadian, A. Gettelman, H. Morrison, K. Bower,  
T.W.Choularton (2008). "Global Temperature  
Stabilization via Controlled Albedo Enhancement  
of Low-level Maritime Clouds". Phil. Trans. Roy.  
Soc. A 366: 3969–87.  
doi:10.1098/rsta.2008.0137

Jeśli raz zaczniemy nie będziemy mogli przestać ani na chwilę.

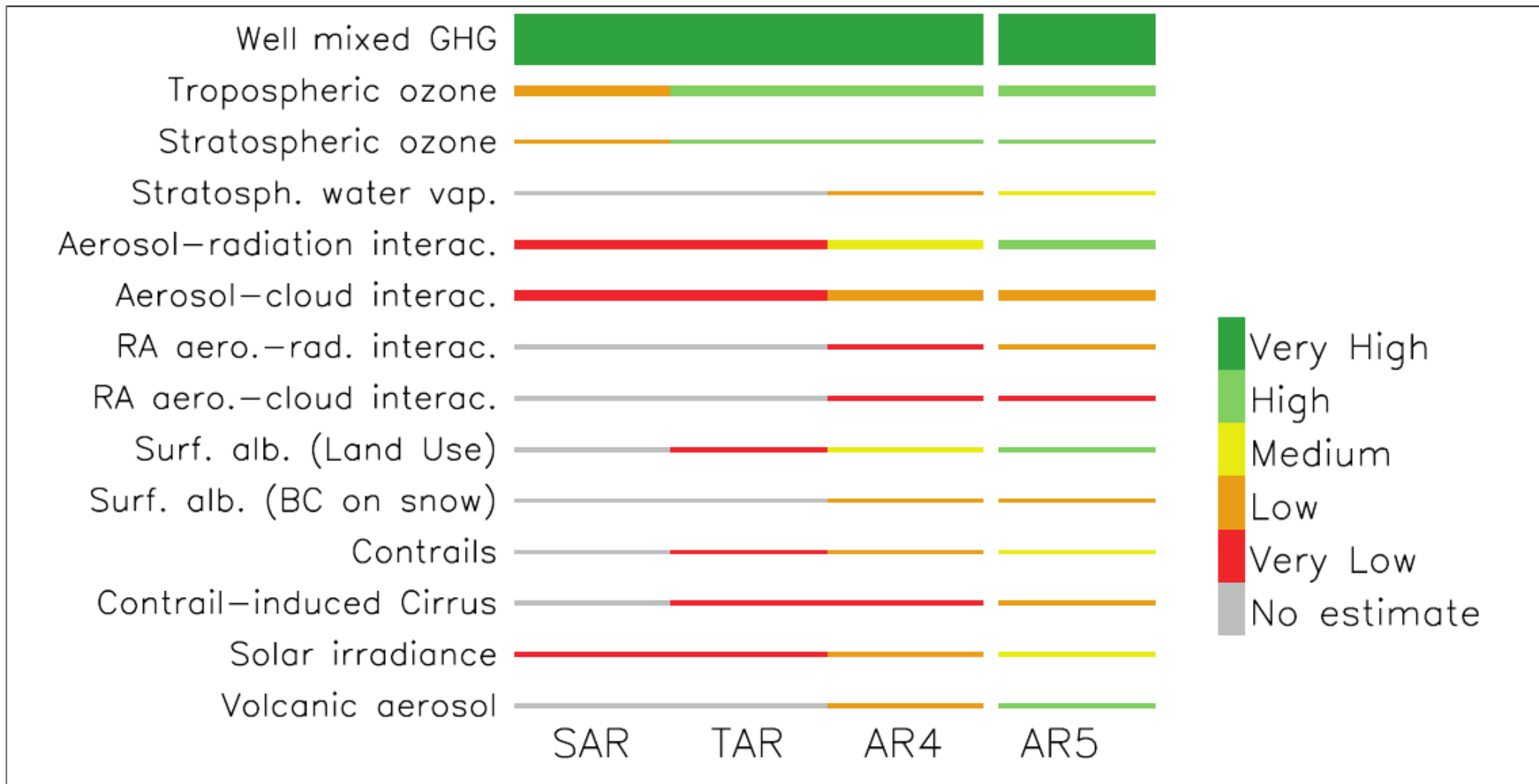
Szare – wzrost temperatury przy rosnącej koncentracji gazów cieplarnianych.

Żółte – kompensacja wymuszania radiacyjnego przez SRM.

Symulacja: w 50 roku rezygnujemy z SRM.



Poziom zrozumienia wpływu różnych czynników na bilans radiacyjny Ziemi.  
Zmiany w kolejnych Raportach IPCC.



<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Podsumowanie:

Jeszcze nie wszystko rozumiemy, ale wiemy że chmury nie ochronią nas przed gwałtownymi zmianami w systemie klimatycznym. Jediną szansą uniknięcia tych zmian jest szybkie zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych.