Významné fenomény ve střední atmosféře

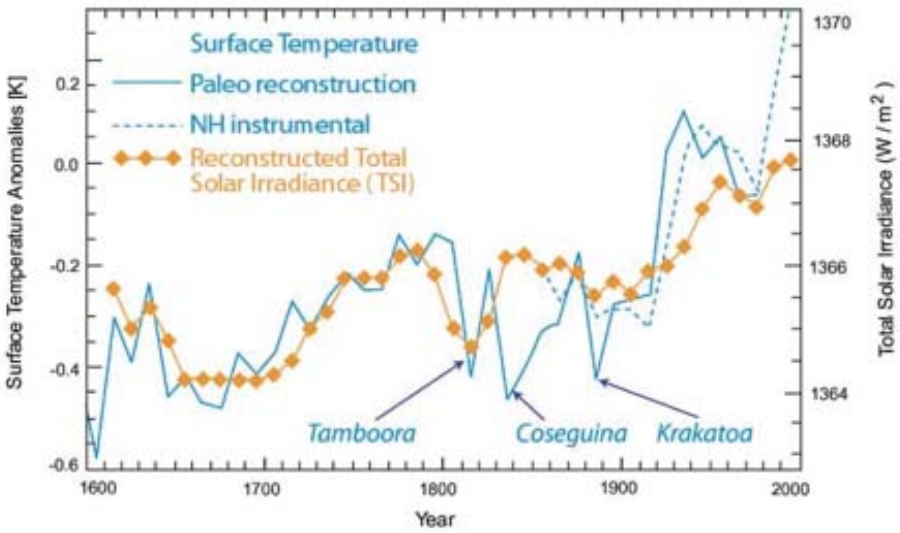
vliv QBO a SSC

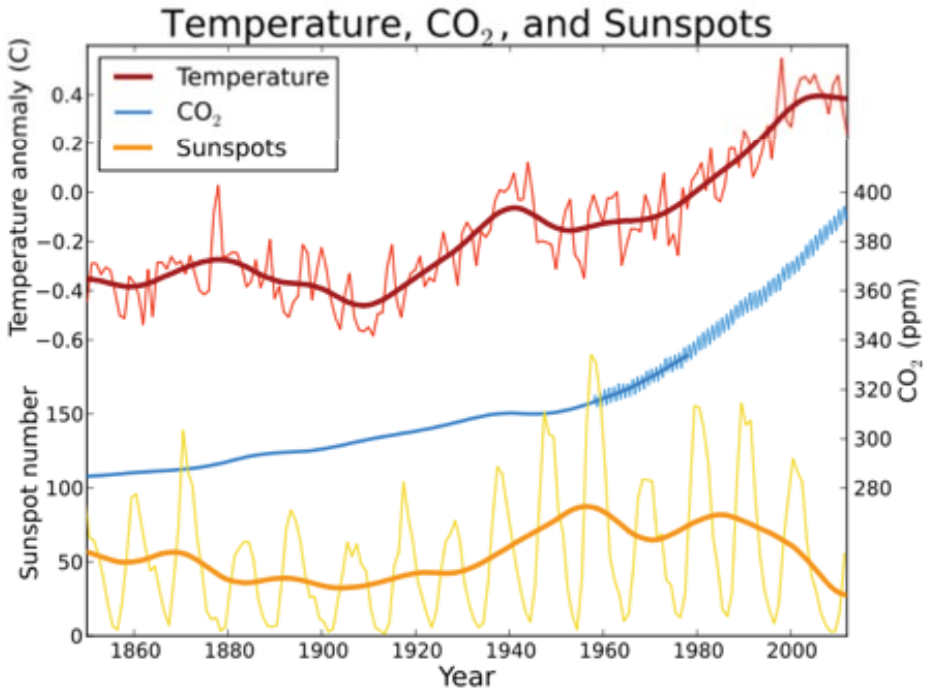
Aleš Kuchař

Katedra meteorologie a ochrany prostředí
Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze

Střední atmosféra a klimatické trendy

- proměnlivost spojena s působením vnějších i vnitřních faktorů
- otázka vlivu zvyšujících se **koncentrací skleníkových plynů** v poměru k dalším aspektům jako je **vliv slunečního cyklu**
- kombinovaný vliv
- nedostatečný přímý radiační forcing, **otázka přenosu slunečního signálu**
- podstatná role střední atmosféry





Náhlé stratosférické oteplení - příčiny

- **průměrné teploty** leden-únor 56-98, 30 hPa a **solární flux** 10.7 cm
- červená a modrá - **fáze ENSO** (W vs. C)
- čtverce a kolečka - **fáze QBO** (WQBO, EQBO)
- **čísla jsou roky**, zvýrazněné významné vulkanické erupce

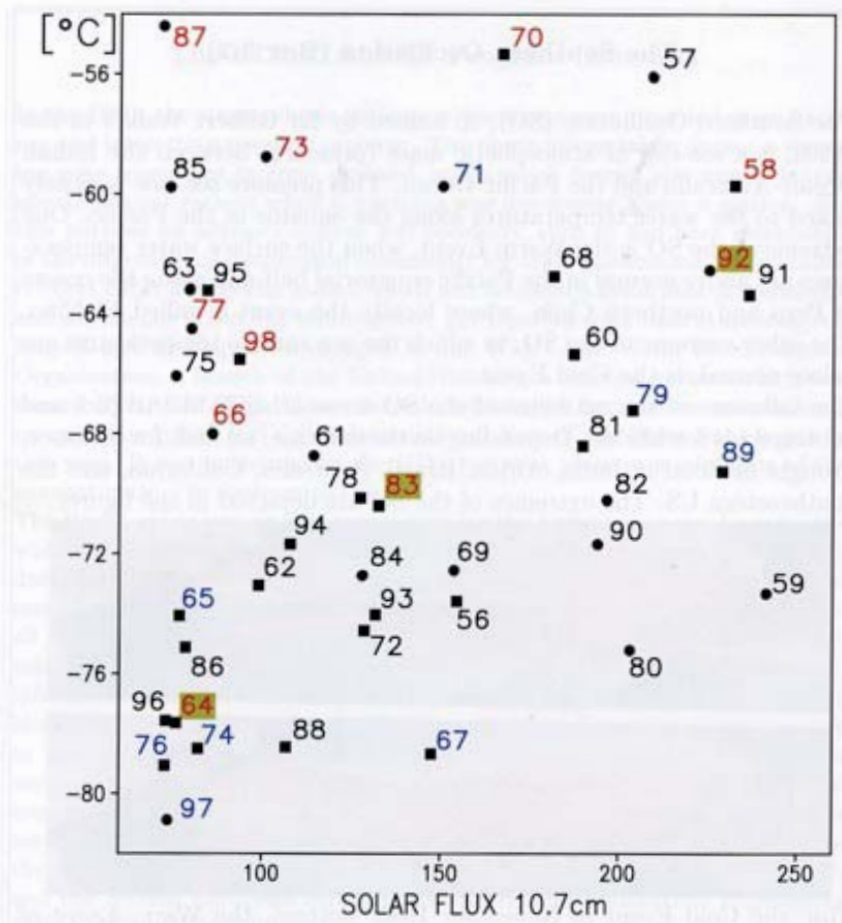


Fig. 3.9: Ordinate: Monthly mean 30-hPa temperatures (°C) at the North Pole (January-February, 1956–1998; abscissa: solar activity (10.7cm flux). Squares denote westerly and dots easterly winds in the lower equatorial stratosphere (QBO, see Chapter 4); red denotes *Warm Events* and blue *Cold Events* in the Southern Oscillation (see Box 3.2). The numbers are the years, and green shading denotes the explosive eruptions of three tropical volcanoes (Adapted from Labitzke and van Loon 1992)

zdroj: Labitzke and Loon, 1999

Náhlé stratosférické oteplení - příčiny

- obecně **destabilizace převládající cirkulace**
- transport energie planetárními vlnami, **vliv různých** (atmosférických) **oscilací**

- geop. výšky v 30 hPa v únoru na severním pólu 1942-2007
- studie **závislosti** prohloubení polární cyklóny **na sluneční aktivitě**
- zahrnutí **vlivu ENSO** (W vs. C)
- zahrnutí **vlivu QBO** (E○/● vs. W□/■)
- vyplněné symboly označují zimy s náhlým str. oteplením
- fenomény je potřeba nejprve popsat

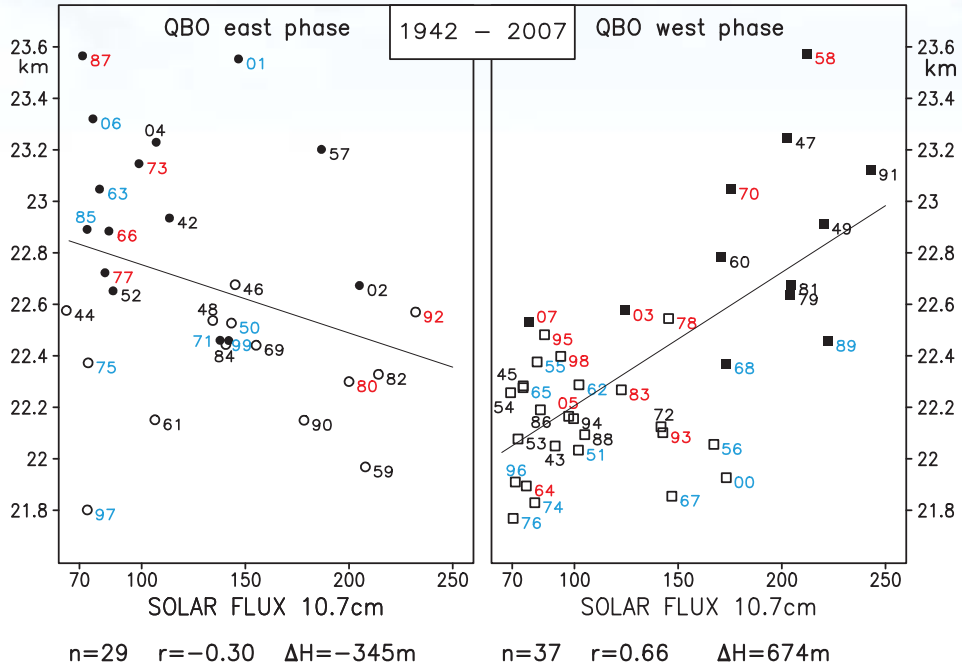


Fig. 4. Scatter diagrams of the monthly mean 30-hPa geopotential heights (geopot.km) in February at the North Pole (1942 till 2007), plotted against the 10.7 cm solar flux. Left: Circles: years in the east phase of the QBO ($n = 29$). Right: Squares: years in the west phase ($n = 37$). The numbers indicate the respective years, with WE in red and CE in blue. Filled symbols denote MMWs. r = correlation coefficient; ΔH gives the mean difference of the heights (geopot.m) between solar maxima (200 s.flux units) and solar minima (70 s.flux units). (Reconstructions: 1942 till 1947; NCEP/NCAR re-analyses: 1948 till 2007.) (van Loon and Labitzke (1994), updated.)

zdroj: Labitzke and Kunze, 2009

El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

- **ENSO** - důležitá role i ve stratosféře, viz průměrné teploty ve 30 hPa na 10°N v prosinci (na rovníku!)
- **písmena** označují významné vulkanické erupce
- kromě roků s erupcemi jasná **korelace nízkých teplot s teplou fází ENSO** a naopak
- během WE abnormální konvekce vede k ochlazení tropopauzy a nízké stratosféry
- to dále ovlivňuje ∇_H teploty a tedy i sílu polárního víru
- rovněž vliv na vývoj Aleutské výše, kdy WE vede k prohloubení níže v troposféře

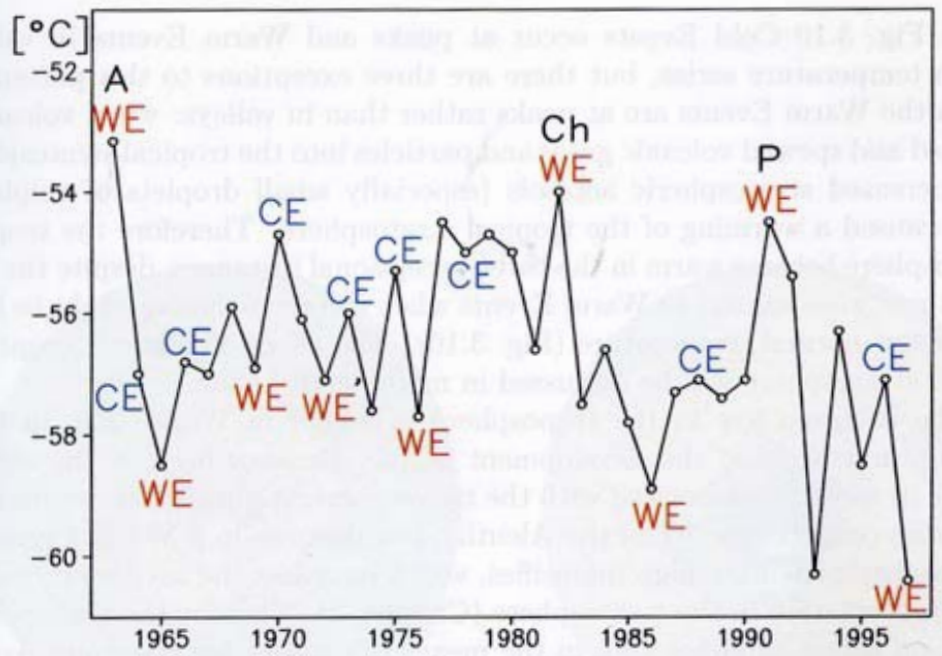
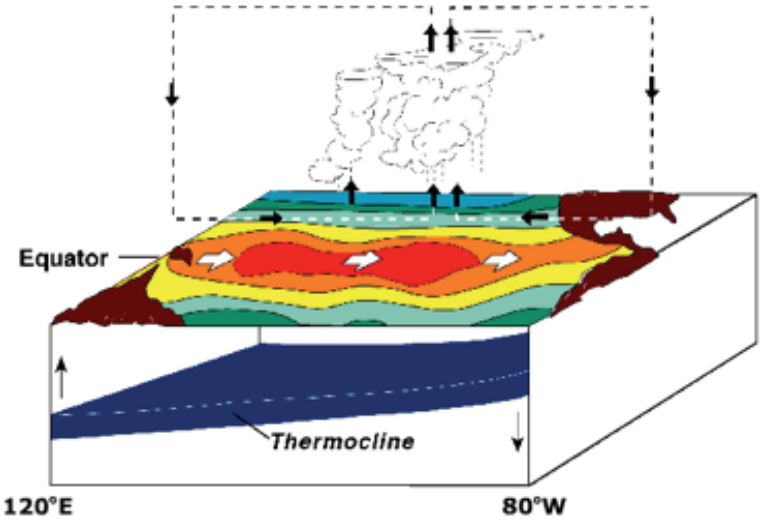


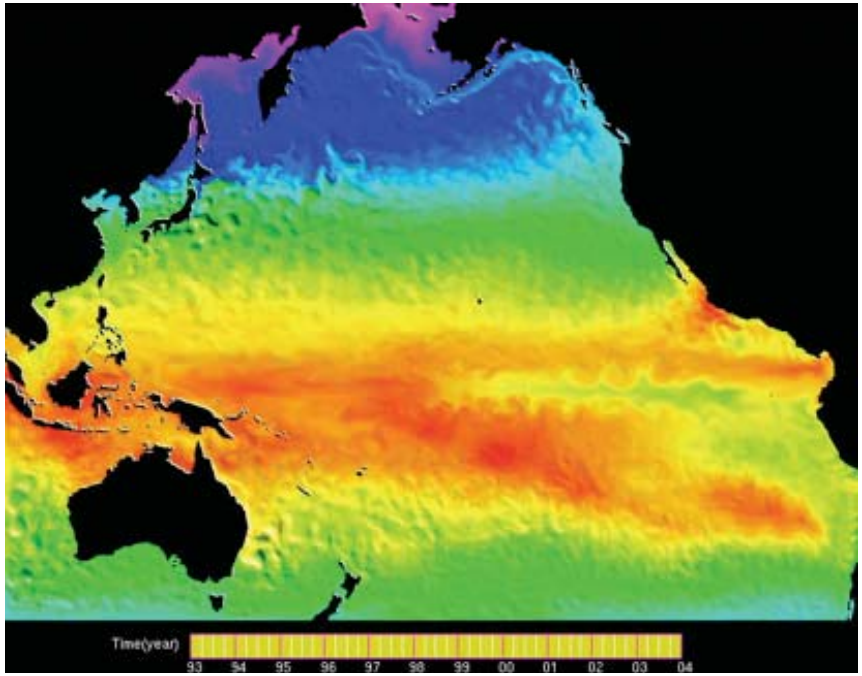
Fig. 3.10: Time series of monthly average 30-hPa temperatures (^{0}C) at 10^{0}N in December for 1963–1997; WE denotes Warm Events , and CE Cold Events. **A**, **CH**, and **P** are the three eruptions of tropical volcanoes (Updated from van Loon and Labitzke 1987)

zdroj: Labitzke and Loon, 1999

El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

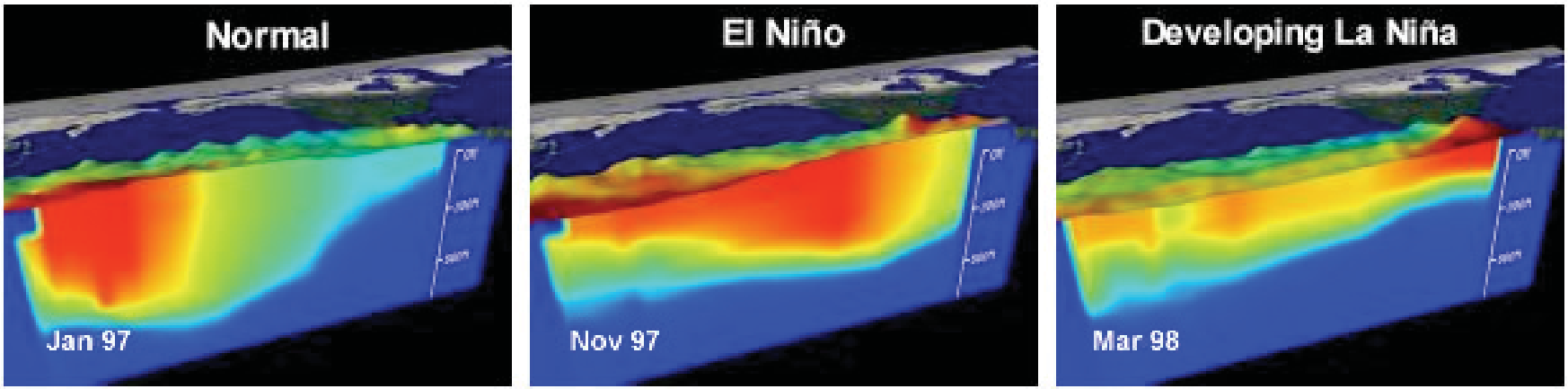
- propojená **atmosféricko-oceánická oscilace**
- jižní oscilace - atmosférická část, El Nino - oceánská část
- oblast centrálního Pacifiku, globální dopad v mnoha parametrech
- **teplá epizoda** doprovázena výraznou konvekcí - prochlazení tropické stratosféry
- snížení horizontálního teplotního gradientu a výraznější rozvoj Aleutské níže
- během teplé epizody spíše SSW





El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

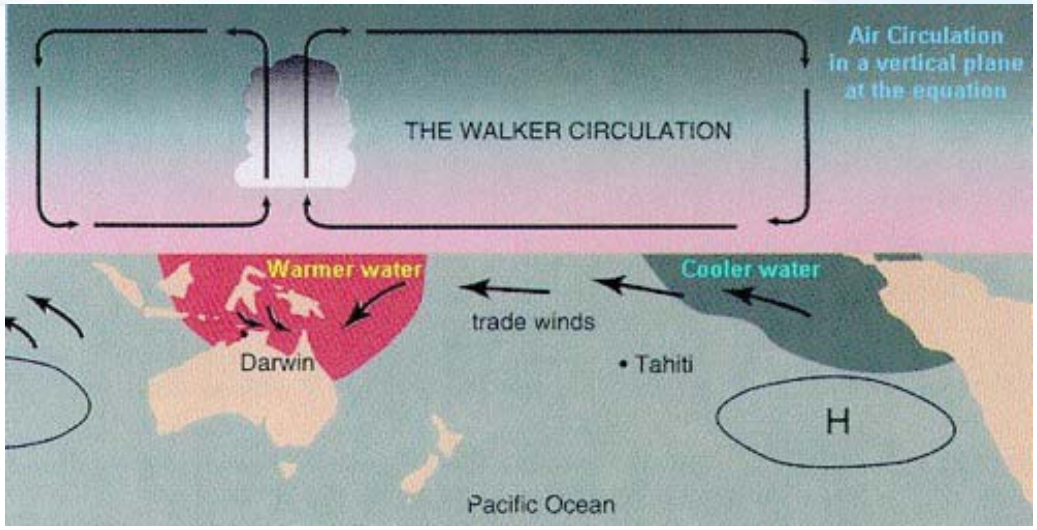
- propojená **atmosféricko-oceánická oscilace**
- oblast centrálního Pacifiku, globální dopad v mnoha parametrech
- **během teplé epizody** spíše SSW při 'normálním' stavu východní pasáty indukují v oceánu pohyb prohřátých vod směrem na západ, kde pak převládá nižší tlak, konvektivní pohyby, vlhčí počasí a hladina oceánu je cca 60 cm výše než na východě.
- vodní/vzdušné masy jsou transportovány zpět výrazně chladnější/sušší
- episoda El Nino představuje přerušení a modifikaci této cirkulace
- episoda La Nina představuje zesílení této cirkulace

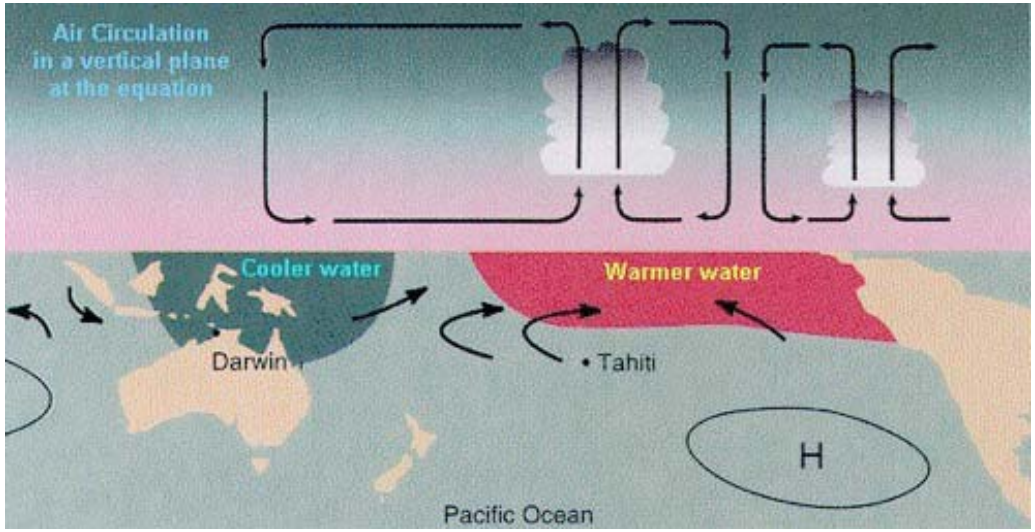


NOAA/PMEL

El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

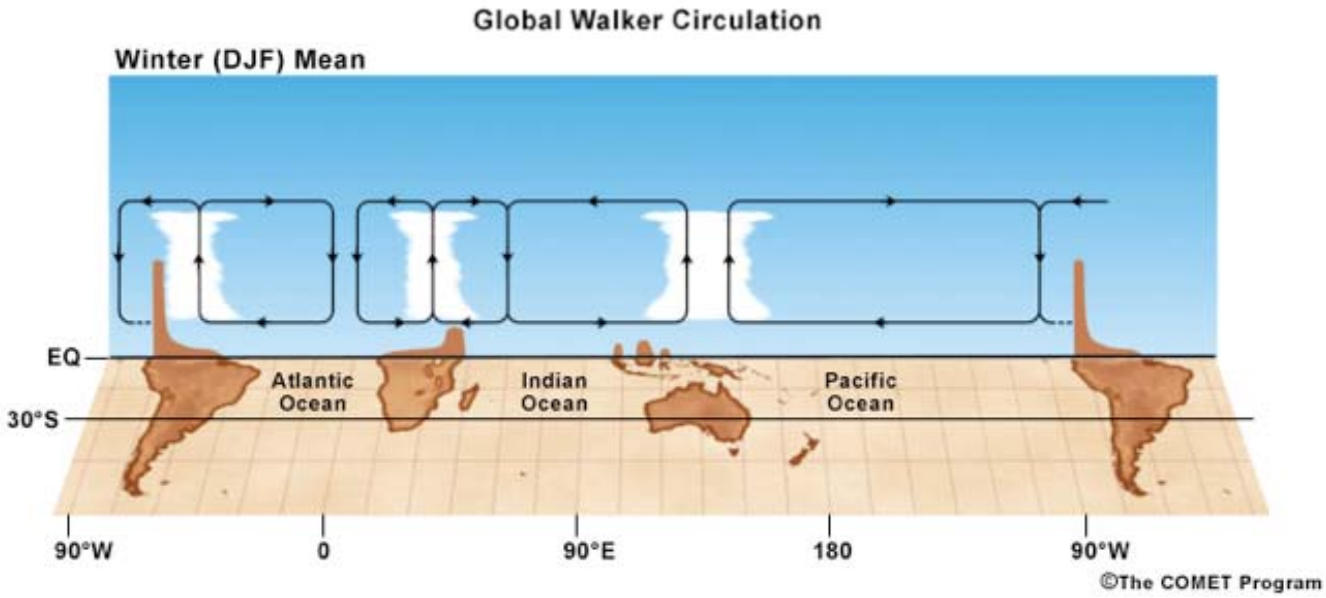
- proměna **Walkerovy cirkulace**
- při ‘normálním’ stavu východní pasáty indukují v oceánu pohyb prohřátých vod směrem na západ, kde pak převládá nižší tlak, konvektivní pohyby, vlhčí počasí a hladina oceánu je cca 60 cm výše než na východě.
- vodní/vzdušné masy jsou transportovány zpět výrazně chladnější/sušší
- episoda El Nino představuje přerušení a modifikaci této cirkulace
- episoda La Nina představuje zesílení této cirkulace





El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

- proměna **Walkerovy cirkulace**
- při 'normálním' stavu východní pasáty indukují v oceánu pohyb prohřátých vod směrem na západ, kde pak převládá nižší tlak, konvektivní pohyby, vlhčí počasí a hladina oceánu je cca 60 cm výše než na východě.
- vodní/vzdušné masy jsou transportovány zpět výrazně chladnější/sušší
- episoda El Nino představuje přerušení a modifikaci této cirkulace
- episoda La Nina představuje zesílení této cirkulace



Aleutská níže - Aleutská výše

- **zesílená konvekce** může vést k výraznějšímu rozvoji Aleutské níže
- to pak vede k většímu naplnění Aleutské výše a výrazné anomálii v poli proudění
- anomálie zřetelná skrze celou stratosféru
- výsledkem je **labilní polární vír**

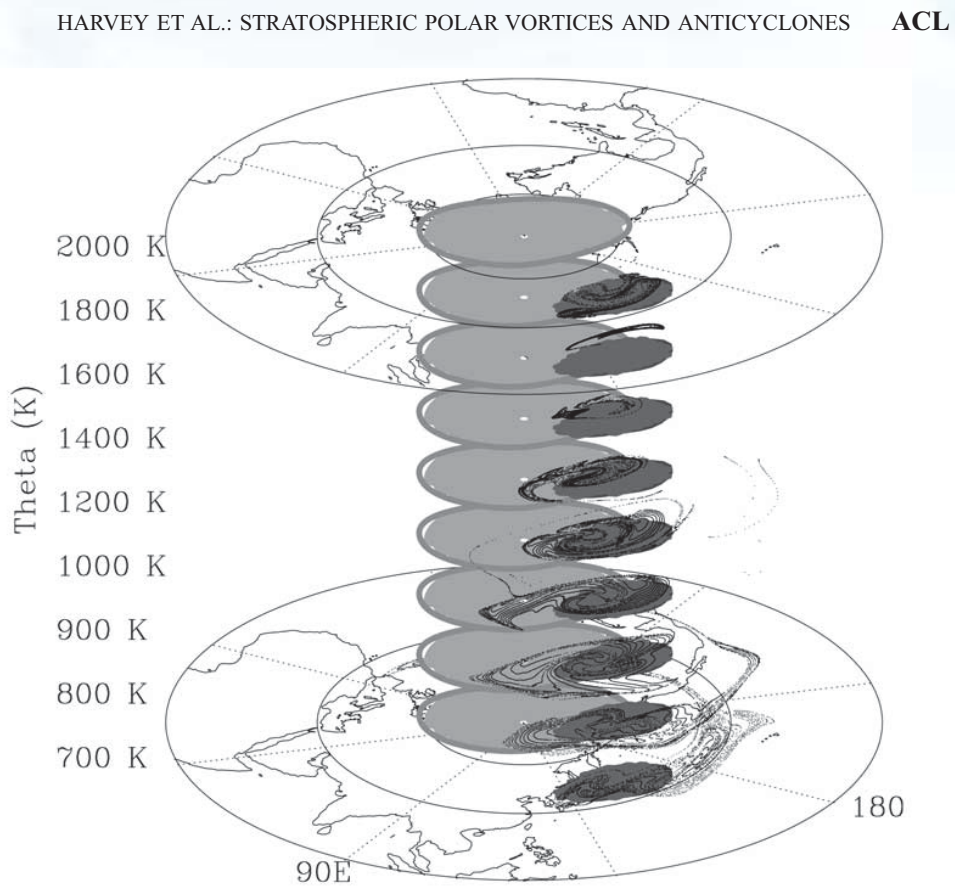


Figure 2. Arctic vortex and Aleutian High edges contoured on 9 overlapping polar stereographic projections on 12 January 2000. The vertical range is from 700 to 1600 K (20–1.5 hPa, or 26–42 km). The Arctic vortex is filled in grey. Material lines (dark contours) are initialized 5 days earlier inside the AH.

zdroj: Harvey et al., 2002

El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

- ENSO ve stratosféře - ovlivnění teplotních gradientů v souvislosti s konvekcí a ovlivnění velkoprostorové cirkulace
- záporné anomálie na rovníku, kladné ve vyšších zeměpisných šířkách
- Manzini (2009): Atmospheric science: ENSO and the stratosphere, Nature

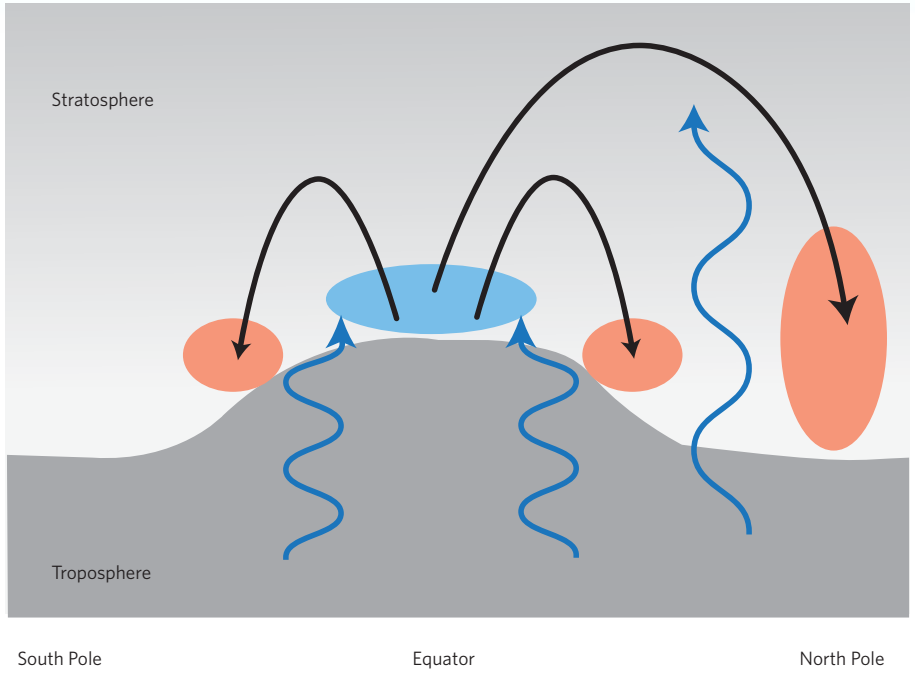


Figure 1 | Dynamical connection between ENSO and the stratosphere. A schematic of the zonal-averaged cross-section of the troposphere and stratosphere shows the remote influence of ENSO. Randel and colleagues[1] provide evidence for the coherent ozone and temperature variations (ovals: positive anomalies in red; negative anomalies in blue) that are associated with ENSO. These variations span the tropics and mid-latitudes, but extend to the Arctic region during winter. Waves propagate up from the troposphere (blue wiggly arrows) and break as they interact with the mean flow. This wave-breaking provides the force that drives the stratospheric circulation (black arrows). The complete chain of events links the conditions at the sea surface to those in the stratosphere.

Arktická oscilace (AO)

- Arctic Oscillation - (atmospheric circulation pattern) atmosférická fluktuace v tlaku v polárních regionech a středními šířkami (45°N)
- periody od dnů do dekád, skrz celou troposféru
- během pozdní zimy a brzkého jara přesahuje do stratosféry, kde ovlivňuje sílu západního cirkumpolárního víru
- negativní fáze - vyšší tlak v polárních oblastech a nižší ve středních šířkách
- v pozitivní fázi vyšší tlak ve středních šířkách posunuje dráhu bouří k severu, vlhčí počasí v Aljašce, Skotsku a Skandinávii, sušší počasí v USA a středomoří

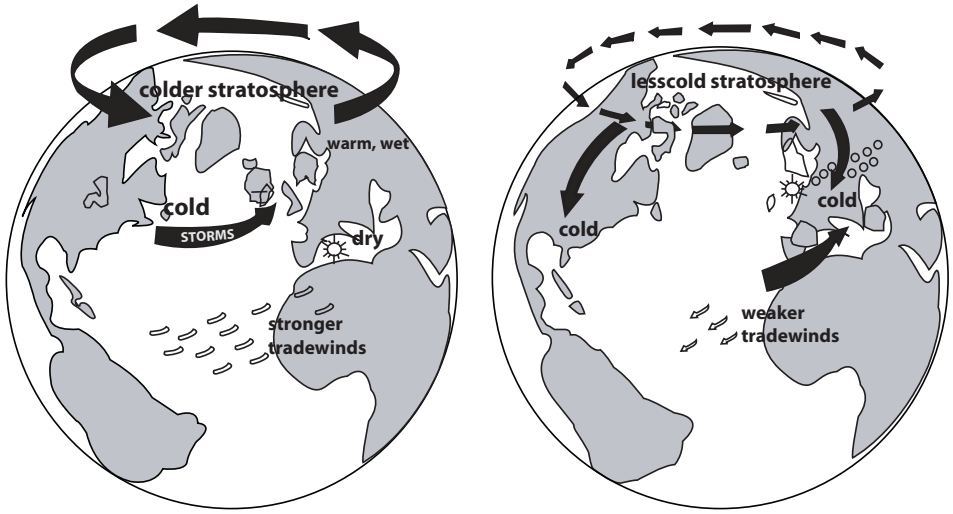


Fig. 1.23 Effects of the positive and negative phases of the Arctic Oscillation (Adapted from R. R. Stuwart 2005, Courtesy: J.M. Wallace)

zdroj: Mohanakumar, 2008

Vulkanické erupce

- ovlivnění od dolní troposféry až po mezosféru
- **Agung** (Bali) - 1963
- **El Chichón** (Mexiko) - 1982
- **Mt. Pinatubo** (Filipíny) - 1991
- nejlépe zdokumentovaná poslední
- významné ochlazení troposféry a ohřátí stratosféry

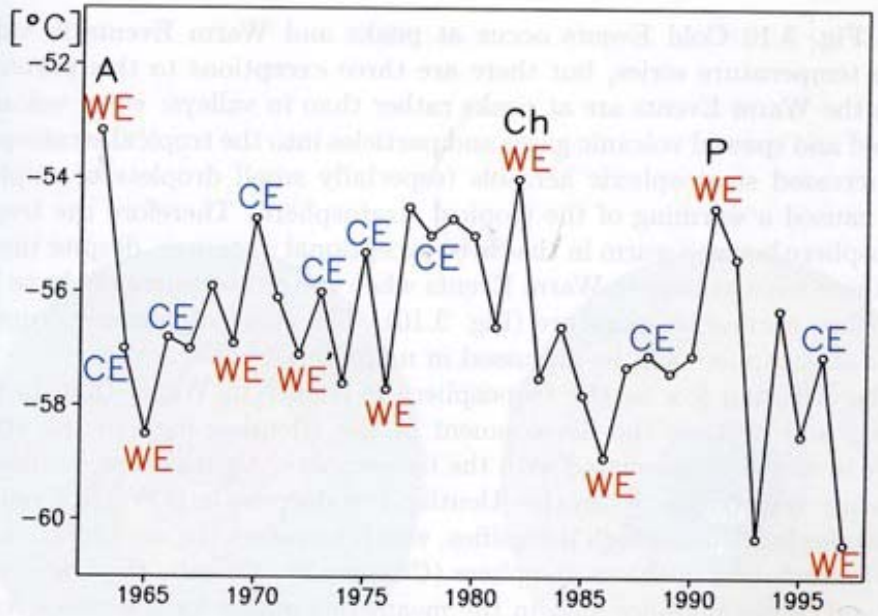
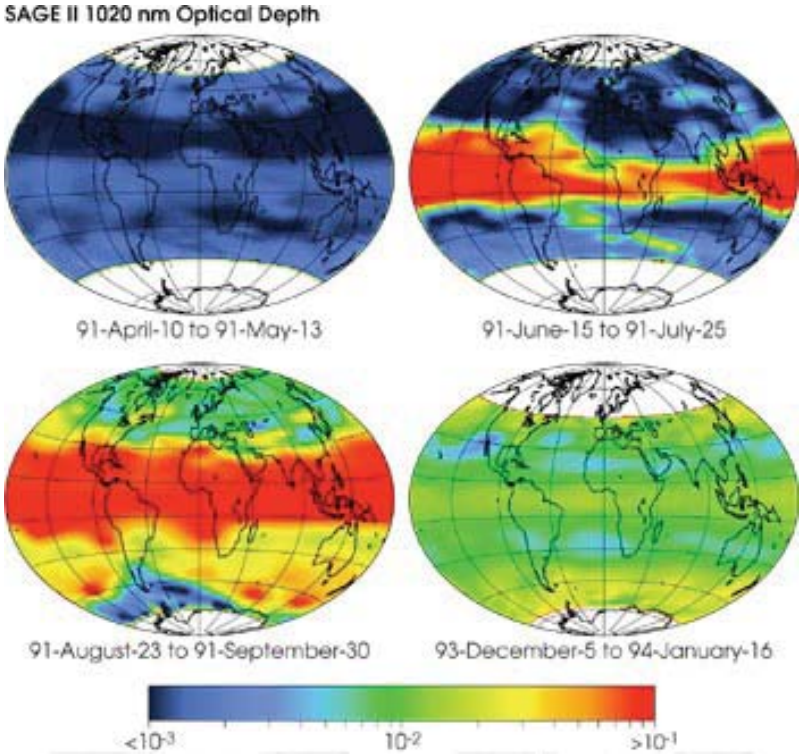


Fig. 3.10: Time series of monthly average 30-hPa temperatures (^{0}C) at 10^{0}N in December for 1963–1997; WE denotes Warm Events , and CE Cold Events. **A**, **CH**, and **P** are the three eruptions of tropical volcanoes (Updated from van Loon and Labitzke 1987)

zdroj: Labitzke and Loon, 1999

Vulkanické erupce - Mt. Pinatubo

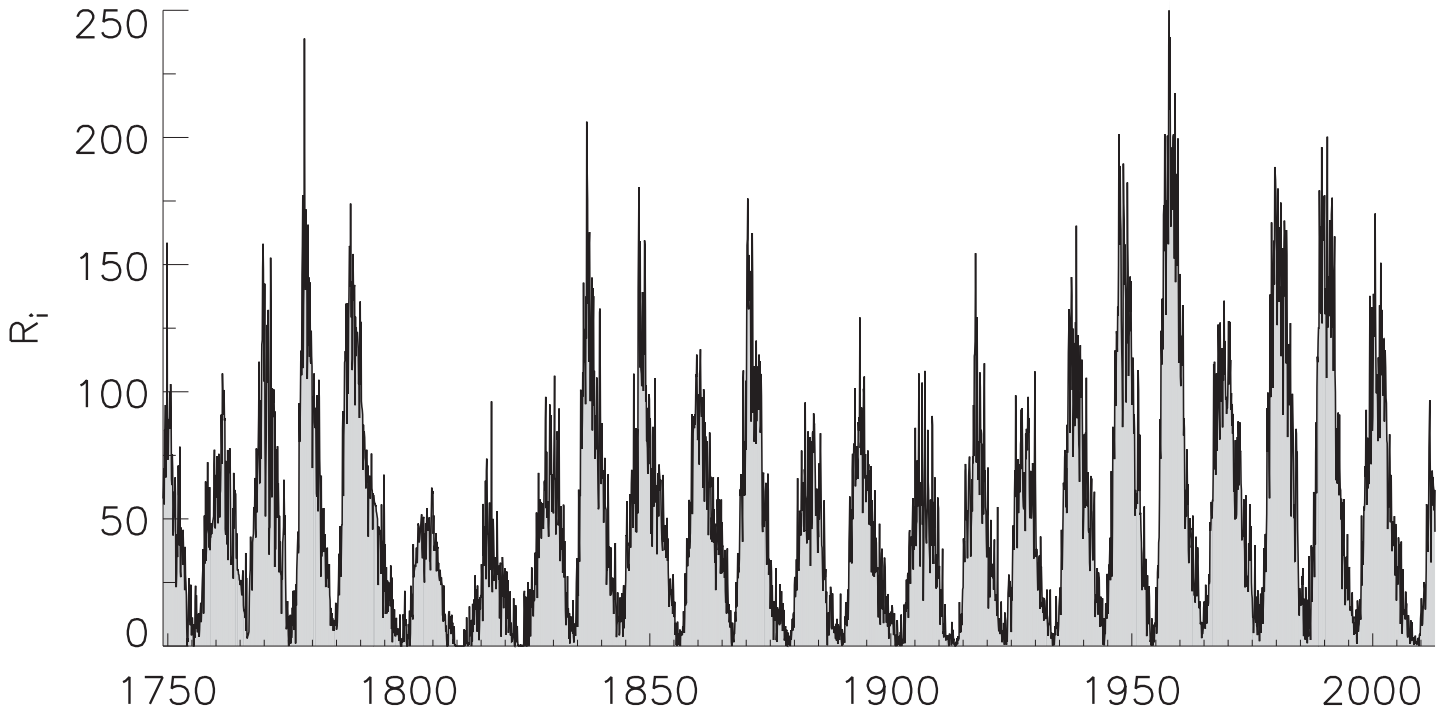
- 15. 6. 1991 - hlavní erupce **Mt. Pinatubo**, až 16 km^3 vulkanického prachu do atmosféry, až $20 \cdot 10^6$ tun SO_2, sloupec až do výšky 24 km
- ∅ T v dolní troposféře poklesla o 0.7° C během následujících 14 měsíců
- ovlivnění od dolní troposféry až po mezosféru
- ovlivnění radiačních bilancí a klimatických podmínek
- významný dopad na obsah ozónu



11-letý sluneční cyklus v atmosféře

- dlouhodobě **popisován v počtu pozorovaných slunečních skvrn**
- rekonstrukce stovky let

zdroj: Kuchař, 2013

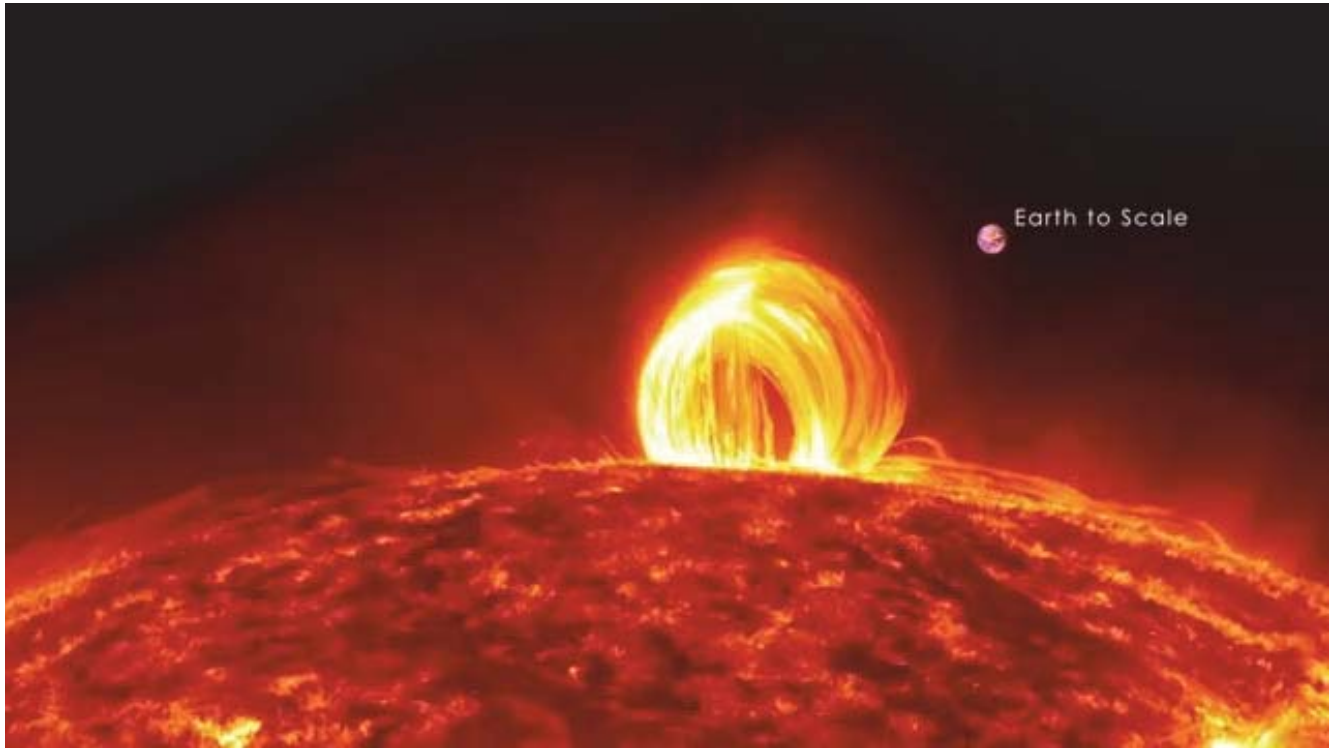


Obrázek 1.1: Časová řada relativního počtu slunečních skvrn R_i za období 1749-2012. Data z (SIDC, 2013).

11-letý sluneční cyklus v atmosféře

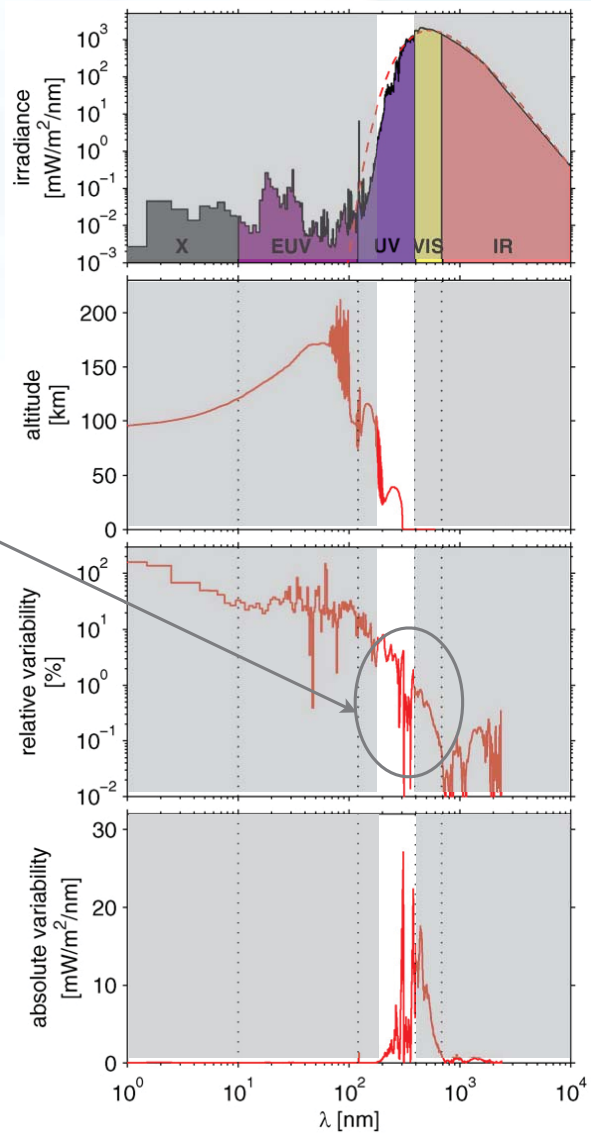
- přibližně 11-letý **cyklus fluktuace polarity magnetického pole na slunci**
- projevuje se **změnami ve vyzařovaném spektru**, celkové dopadající energii a rovněž v charakteristikách slunečního větru (čímž ovlivňuje také množství dopadajících kosmických paprsků díky interakci s magnetickým polem země)
- dlouhodobě **popisován v počtu pozorovaných slunečních skvrn**

zdroj: http://www.youtube.com/watch?v=HFT7ATLQQx8

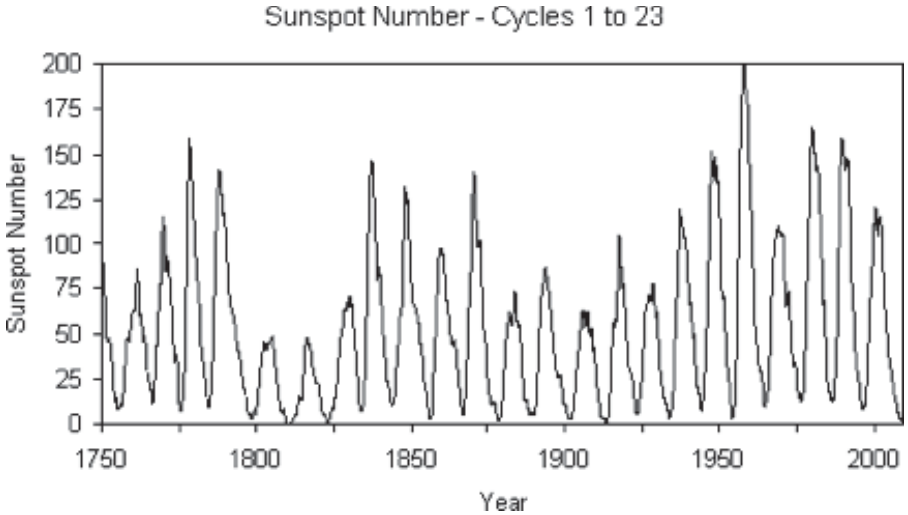


11-letý sluneční cyklus v atmosféře

- dlouhodobé pozorování počtu skvrn, **Solar Sunspot Cycle - SSC**
- změna vyzařovacích charakteristik
- změna solární konstanty o cca 1 w/m^2 (< 1‰)
- **změny v UV spektru (řádově až %)**
- změny v charakteristikách slunečního větru a jeho působení na magnetické pole Země



zdroj: de Wit and Watermann, 2010



11-letý sluneční cyklus v atmosféře

- změny v UV spektru (řádově až %)
- **ovlivnění produkce ozónu** v tropické stratosféře a změny záření v oblasti absorpce ozónem
- ve výsledku **teplotní anomálie** a tedy **dopad na cirkulaci**

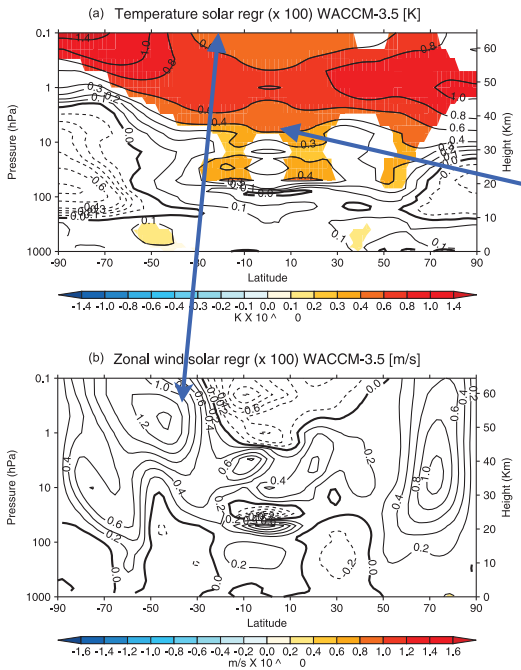


Figure 2. Solar cycle response in (a) zonal mean temperature and (b) zonal mean zonal wind, represented as solar regression coefficient (× 100 sfu) for the full reference period 1960–2005 in WACCM3.5. Colored fields are greater than 2σ. Contours are drawn every 0.1 K. Solid contour lines are drawn to indicate positive values (i.e., warming in Figure 2a and westerly anomalies in Figure 2b), while dashed contours indicate negative values (cooling in Figure 2a and easterly anomalies in Figure 2b).

zdroj: Chiodo et al., 2012

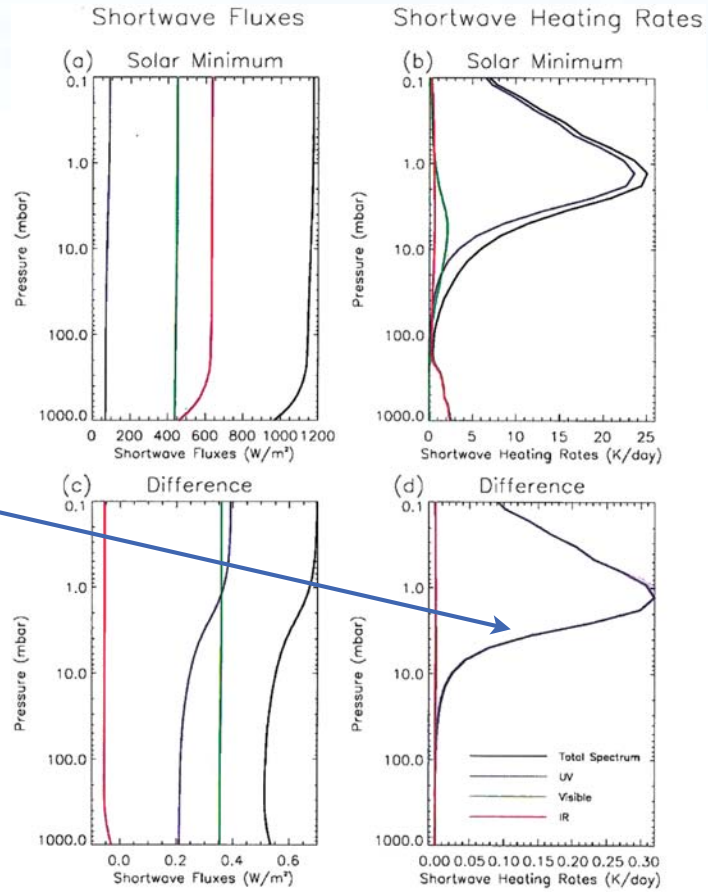
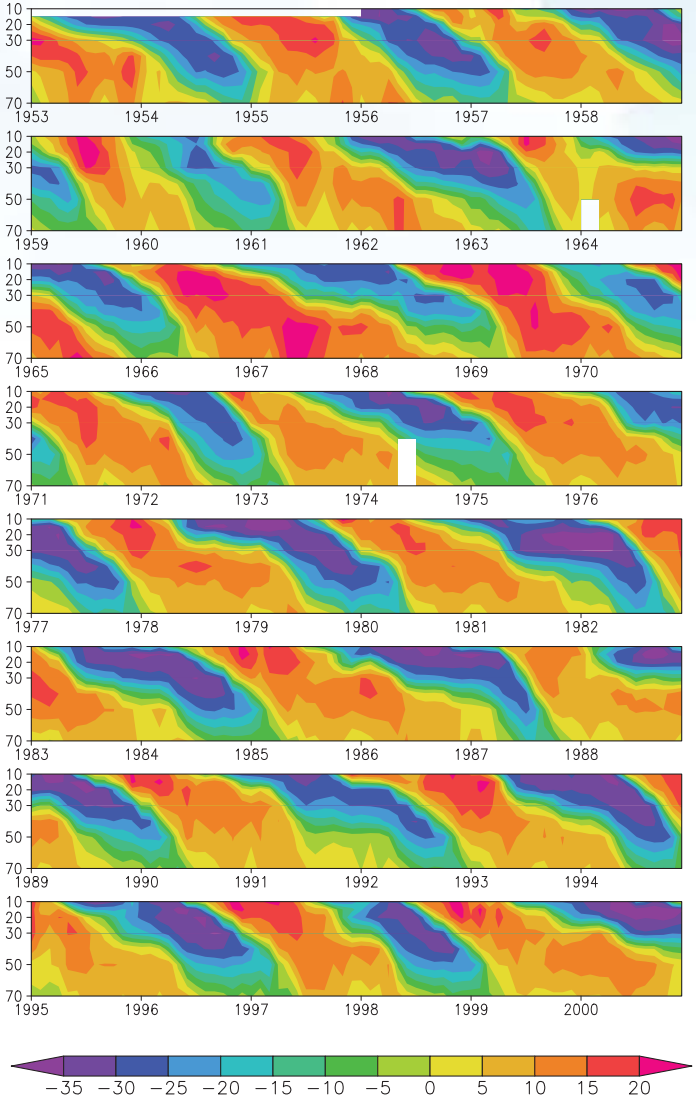


Plate 1. Profiles of (left) solar flux and (right) heating rate, integrated in three spectral bands: UV (220–320 nm) in blue, visible (320–690) in green, and near IR (690–1000 nm) in red for an overhead Sun. (top) Values for solar minimum. (bottom) Difference between solar maximum and minimum. From *Larkin* [2000]. See also *Larkin et al.* [2000].

zdroj: Larkin et al., 2000

Kvazibienální oscilace

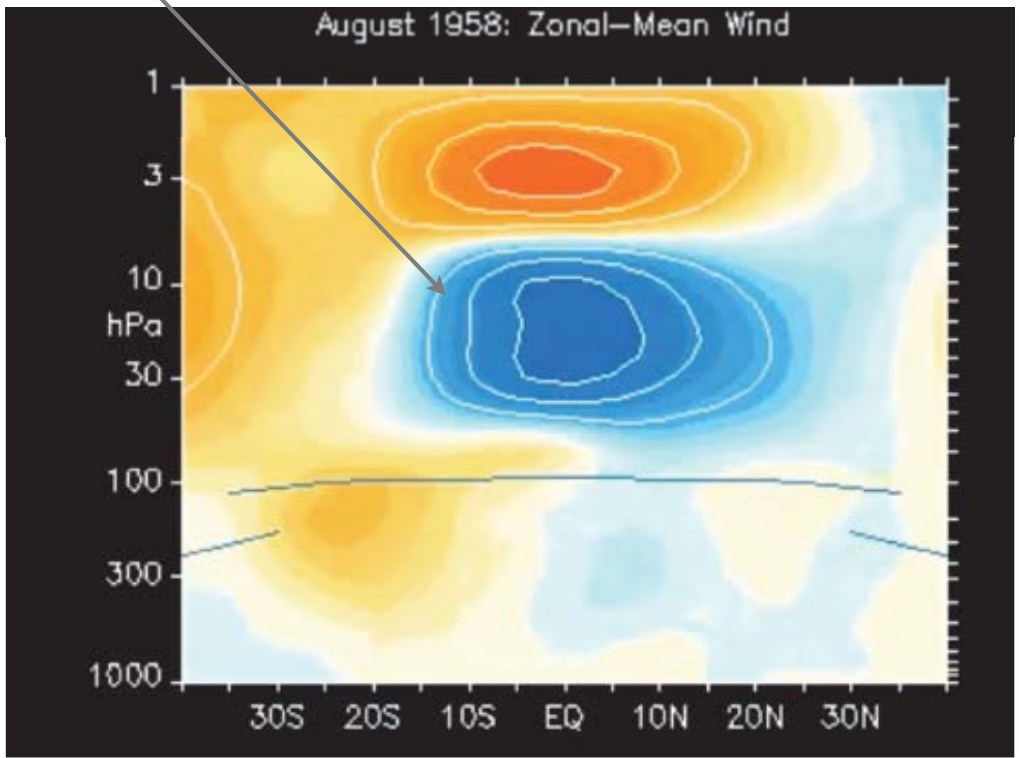
- kvazi-dvouletá **oscilace směrů zonálních větrů v tropické stratosféře**
- Quasi-biennial Oscillation - **QBO**
- definice v zeměpisných šířkách kolem 10° – 15° od rovníku
- daná fáze se objevuje nahoře a klesá
- objevení a popis 60-70. léta 20. století
- vznik **díky pohyblivým tropickým atmosférickým vlnám**
- vertikální **přenos** západní (Kelvinovy vlny) a východní (Rossbyho-gravitační vlny) **hybnosti**



zdroj: Kuchař, 2011

Kvazibienální oscilace

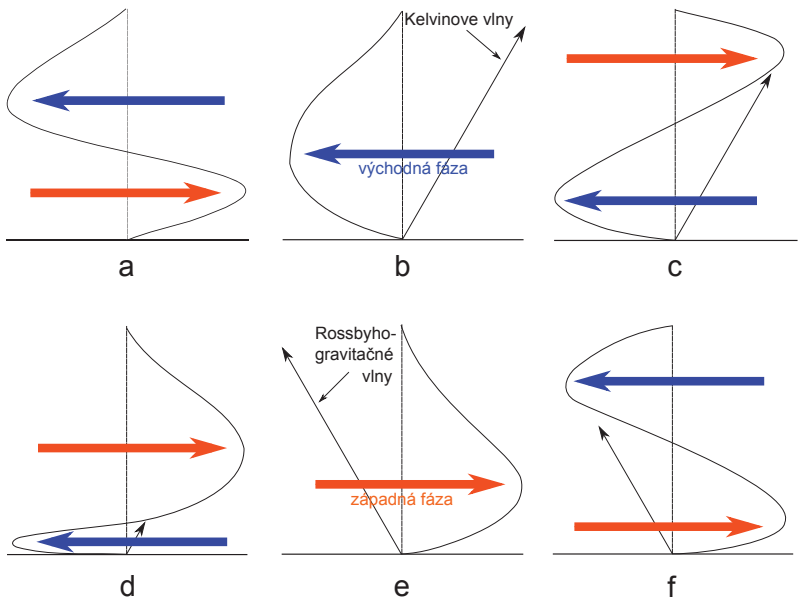
- kvazi-dvouletá **oscilace směrů zonálních větrů v tropické stratosféře**
- Quasi-biennial Oscillation - **QBO**
- definice v zeměpisných šířkách kolem 10° – 15° od rovníku
- daná fáze se objevuje nahoře a klesá
- objevení a popis 60-70. léta 20. století
- vznik **díky pohyblivým tropickým atmosférickým vlnám**
- vertikální **přenos** západní (Kelvinovy vlny) a východní (Rossbyho-gravitační vlny) **hybnosti**



zdroj: http://www.nwra.com/resumes/baldwin/

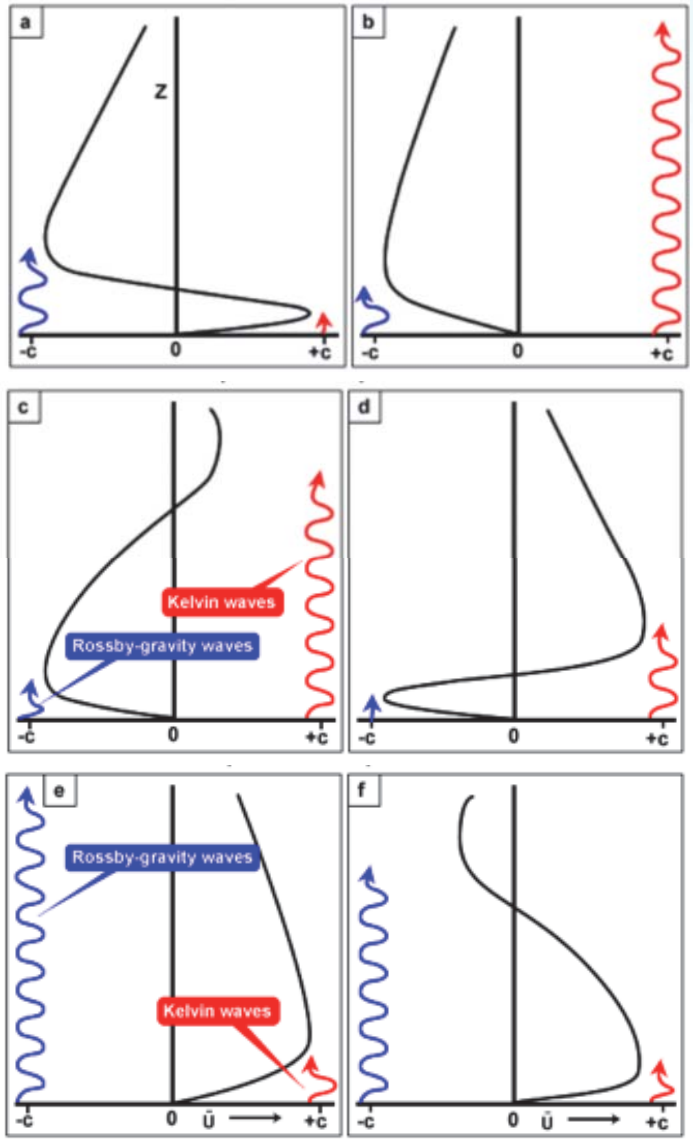
Kvazibienální oscilace

- vznik **díky pohyblivým tropickým atmosférickým vlnám**
- vertikální **přenos** západní (Kelvinovy vlny) a východní (Rossbyho-gravitační vlny) **hybnosti**
- v závislosti na směru proudění dochází k disipaci vln a transportu hybnosti



Obr. 3.3: *Zmena fáz QBO, čierna krivka znázorňuje vertikálny profil ekvatoriálnych zonálnych vetrov.*

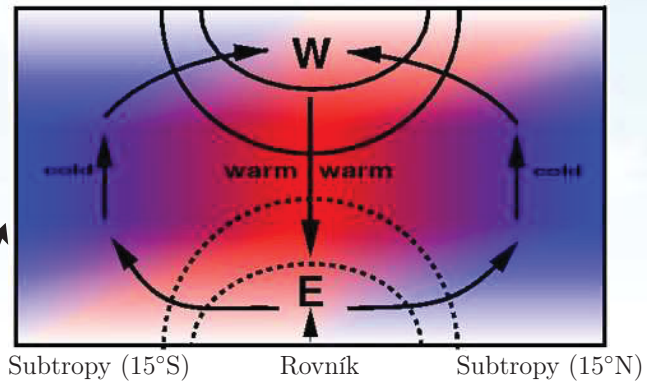
zdroj: Kupčihová Z. 2014



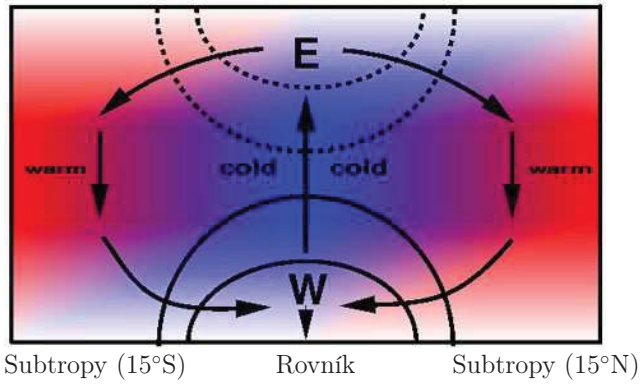
Kvazibienální oscilace

- **vliv i v extratropických oblastech**
- proměnlivý vertikální střih větru - **ovlivnění horizontálního gradientu teploty**
- indukované **změny meridionálních** rychlostí a ovlivnění **vertikálních pohybů**
- $$\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial \ln p} = -\frac{R}{f}\mathbf{k} \times \nabla_p T$$
- **západní fáze** QBO - západní vítr sestupuje do nižších výškových hladin a horizontální teplotní gradient směřující ze subtropů k rovníku je kladný, **kladná teplotní anomálie**
- to dále implikuje **anomálie v meridionálních a vertikálních pohybech** a má **dopad na** Brewer-Dobson cirkulaci a tedy **množství ozónu**

Západní fáze QBO



Východní fáze QBO



zdroj: Kuchař, 2011

Kvazibienální oscilace

- nejedná se o jev limitovaný oblastí střední tropické stratosféry
- **ovlivnění globálních podmínek**
- ve vyšších hladinách (nad 50 km) další výrazná oscilace - půlroční SAO

- data a další informace na například:
  http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/
  http://www.nwra.com/resumes/baldwin/
  http://sandrolubis.wordpress.com/qbo-monitoring-1953-present/

- výborný přehledový článek
  Baldwin et al. (2001):
  The quasi-biennial oscillation

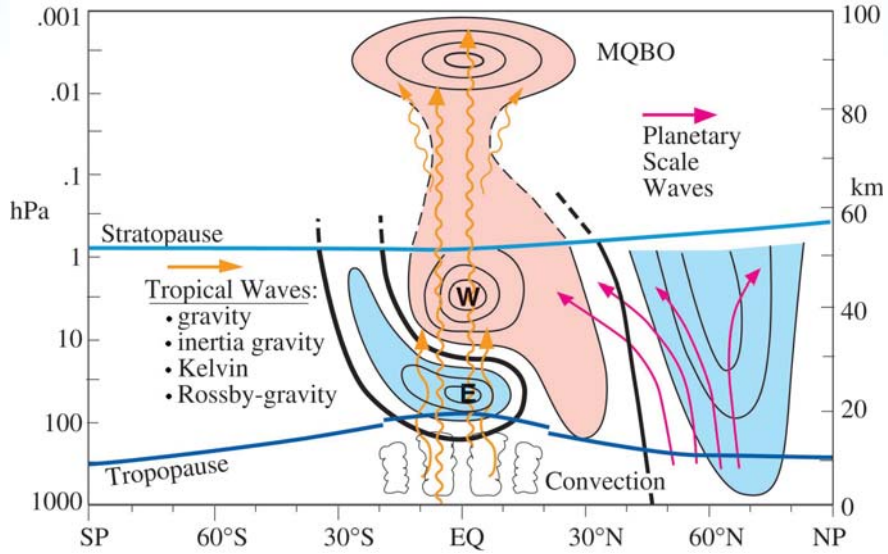


Plate 2. Dynamical overview of the QBO during northern winter. The propagation of various tropical waves is depicted by orange arrows, with the QBO driven by upward propagating gravity, inertia-gravity, Kelvin, and Rossby-gravity waves. The propagation of planetary-scale waves (purple arrows) is shown at middle to high latitudes. Black contours indicate the difference in zonal-mean zonal winds between easterly and westerly phases of the QBO, where the QBO phase is defined by the 40-hPa equatorial wind. Easterly anomalies are light blue, and westerly anomalies are pink. In the tropics the contours are similar to the observed wind values when the QBO is easterly. The mesospheric QBO (MQBO) is shown above ~80 km, while wind contours between ~50 and 80 km are dashed due to observational uncertainty.

Náhlé stratosférické oteplení - příčiny

- **nejednoznačný vliv SSC a QBO**
- vliv QBO - tzv. **Holton-Tan vztah** - stabilní polární vír pro západní QBO
- platí hlavně pro minimum sluneční aktivity - pro aktivní slunce jiné podmínky
- k dalšímu popisu je potřeba nejprve představit základy cirkulace a dalších specifik podmínek ve stratosféře

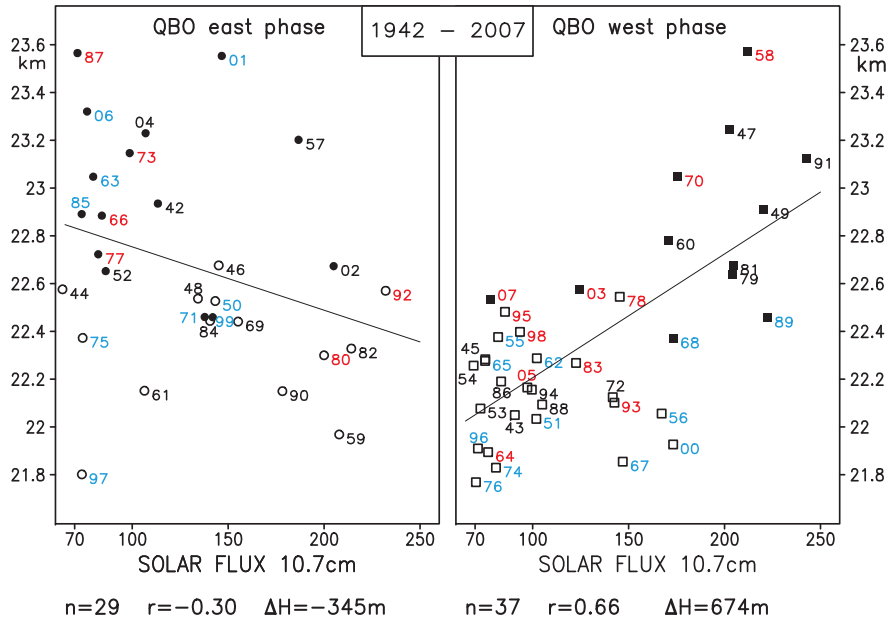


Fig. 4. Scatter diagrams of the monthly mean 30-hPa geopotential heights (geopot.km) in February at the North Pole (1942 till 2007), plotted against the 10.7 cm solar flux. Left: Circles: years in the east phase of the QBO ($n = 29$). Right: Squares: years in the west phase ($n = 37$). The numbers indicate the respective years, with WE in red and CE in blue. Filled symbols denote MMWs. r = correlation coefficient; ΔH gives the mean difference of the heights (geopot.m) between solar maxima (200 s.flux units) and solar minima (70 s.flux units). (Reconstructions: 1942 till 1947; NCEP/NCAR re-analyses: 1948 till 2007.) (van Loon and Labitzke (1994), updated.)

zdroj: Labitzke and Kunze, 2009

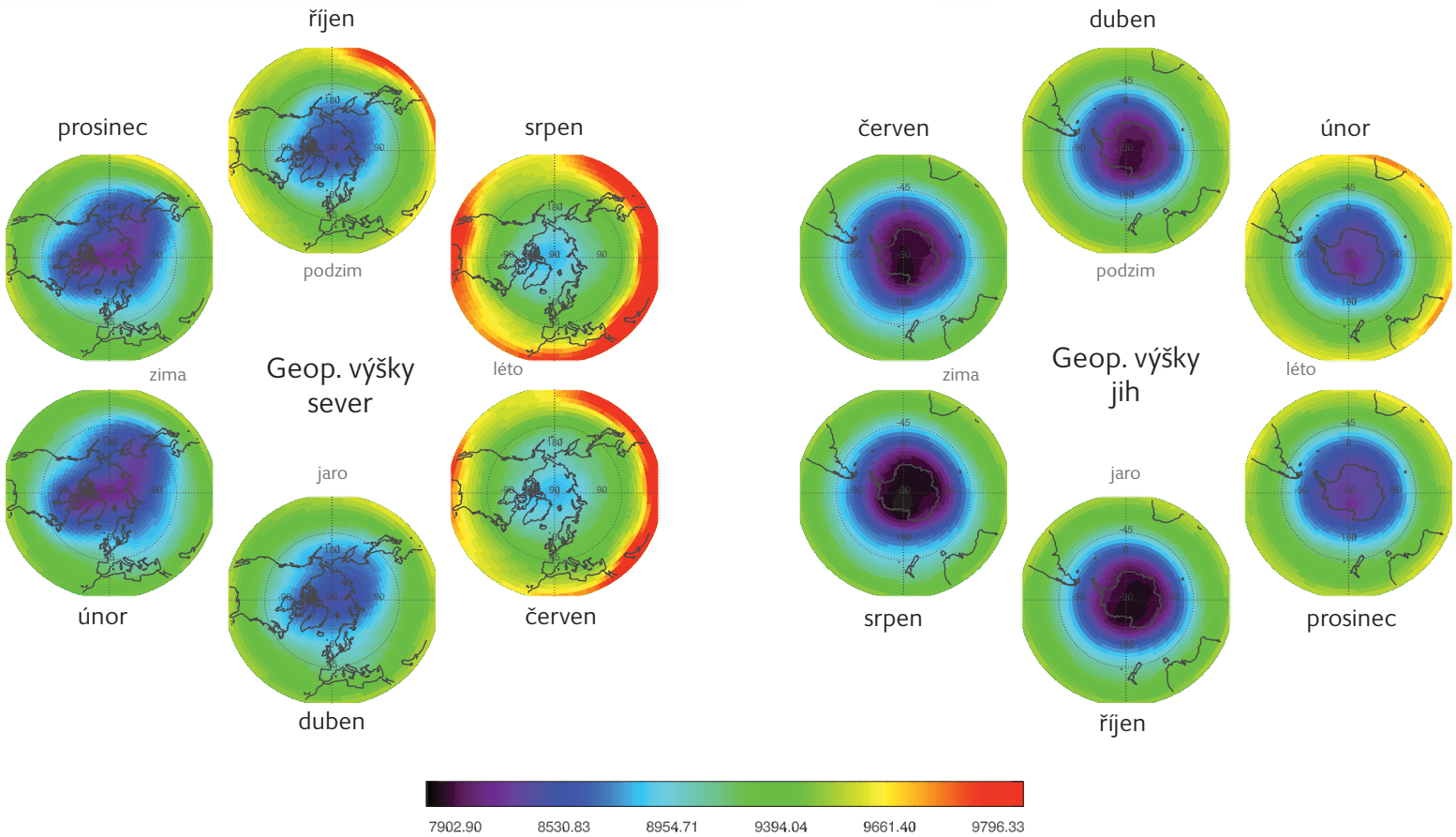
Cirkulace ve stratosféře a významné oscilace

- **charakteristická polární cirkulace**, vytvoření polárního víru
- **na severu** pozorované náhlé stratosférické oteplení
- **na jihu** stabilní podmínky (podporující vznik ozónové díry)
- **vliv významných oscilací** - ENSO, QBO a SSC ...
- kombinovaný vliv jednotlivých fenoménů

- **ENSO** - proměna podmínek tropické konvekce (dopad i na QBO), ovlivnění teplotního gradientu a rozvoje anomálií v poli proudění
- **SSC** - proměna množství dopadajícího UV záření, ovlivnění produkce ozónu, teplotní anomálie v horní stratosféře, ovlivnění související cirkulace
- **QBO** - cyklická změna zonálního proudění v tropické stratosféře díky vertikálnímu přenosu hybnosti tropickými atmosférickými vlnami, ovlivnění horizontálního teplotního gradientu a s tím spojené cirkulační anomálie

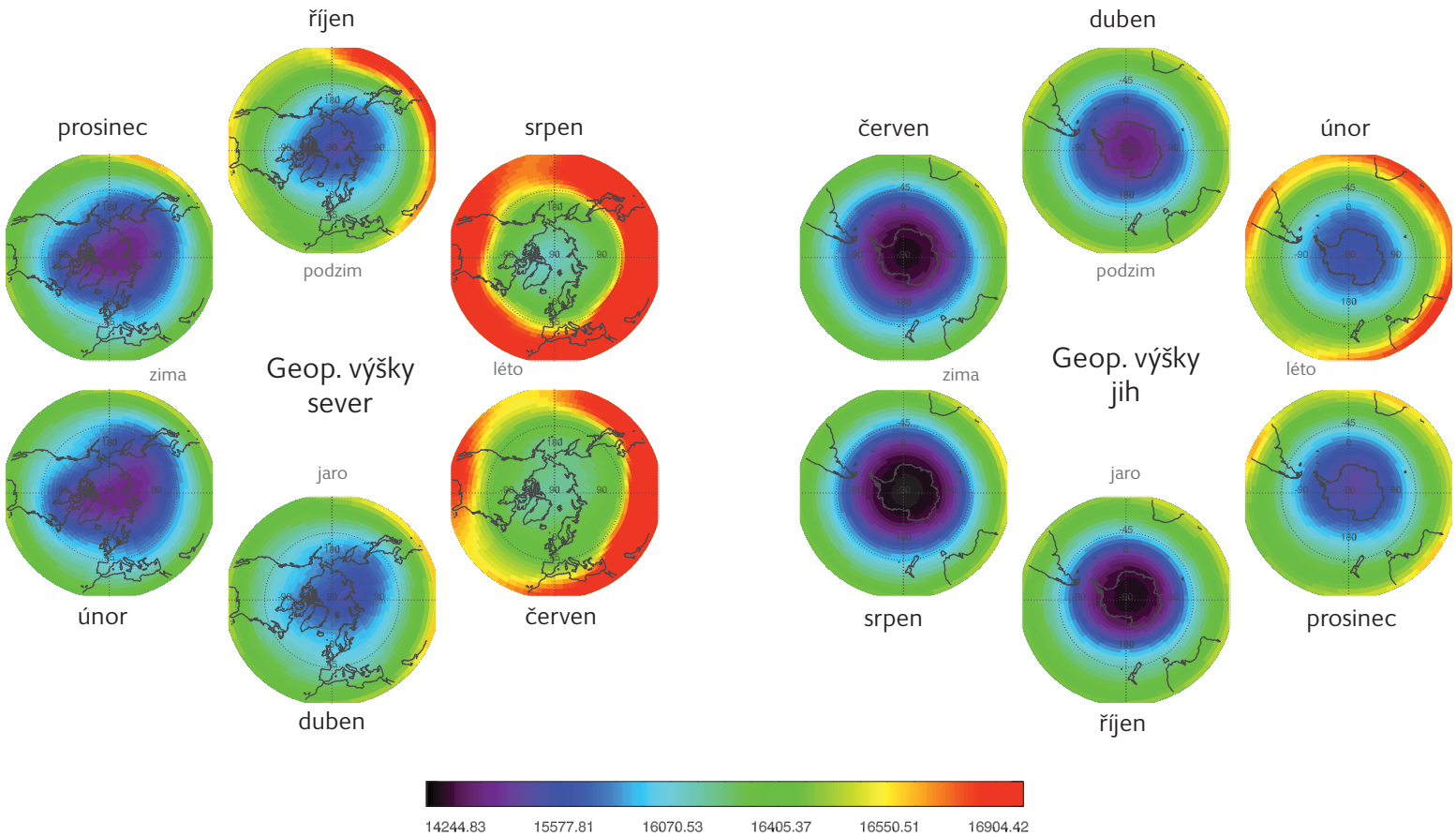
Stratosféra - geop. výšky ve 300 hPa (~9 km)

- **horní hranice troposféry** - odráží radiační a tepelné poměry u povrchu
- **na pólech níže** a západní proudění, výrazné v zimě
- v nižších šířkách oblast vyššího tlaku vzduchu
- souvislost s prouděním i s polem teploty



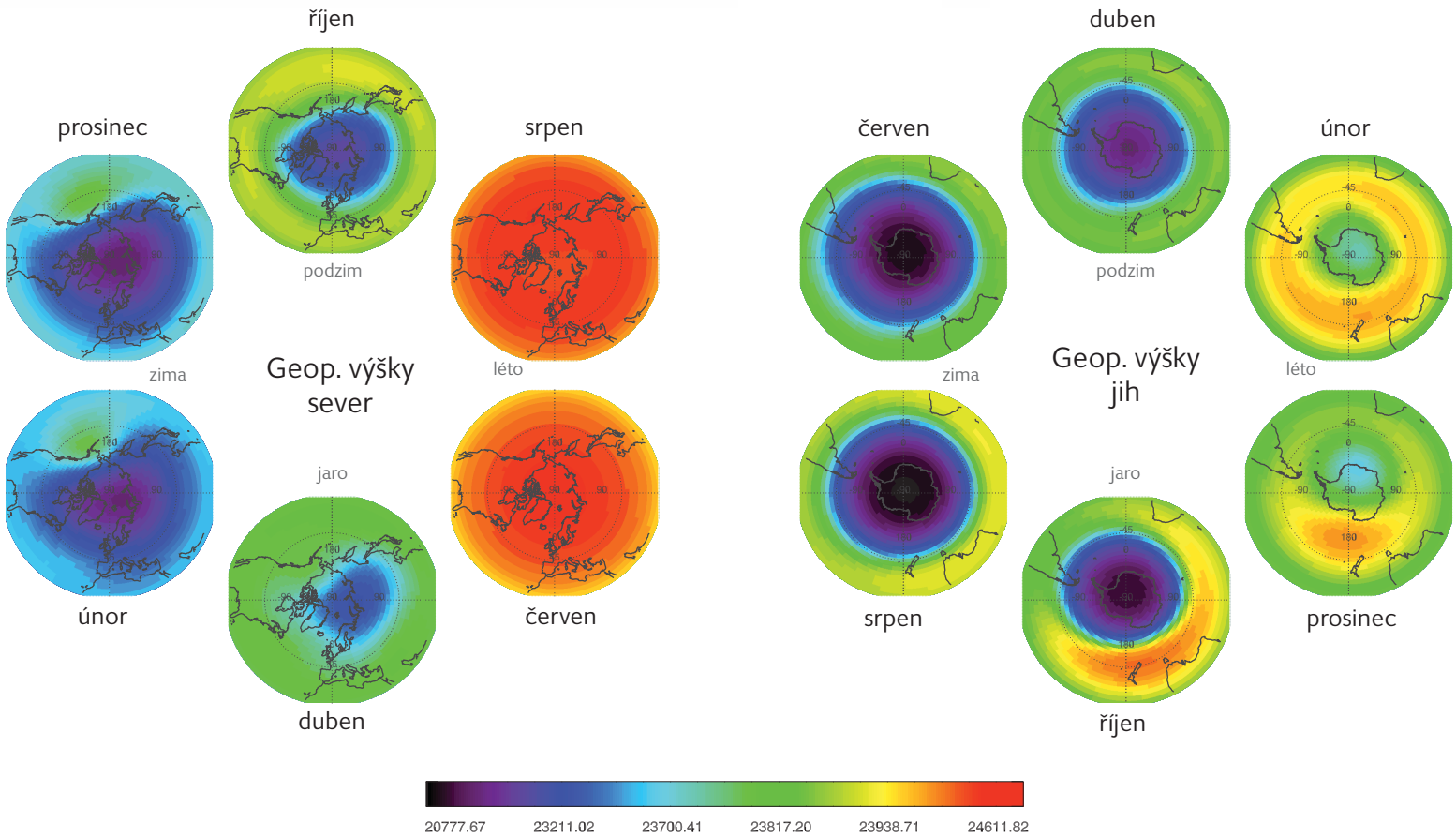
Stratosféra - geop. výšky ve 100 hPa (~16 km)

- **spodní stratosféra** - podmínky podobné jako u tropopauzy
- na pólech podobně jako ve 300 hPa - výrazná zimní níže
- **níže více prohloubená na jihu**, formování polárního víru
- oblasti vysokého tlaku v nižších šířkách zejména na severu



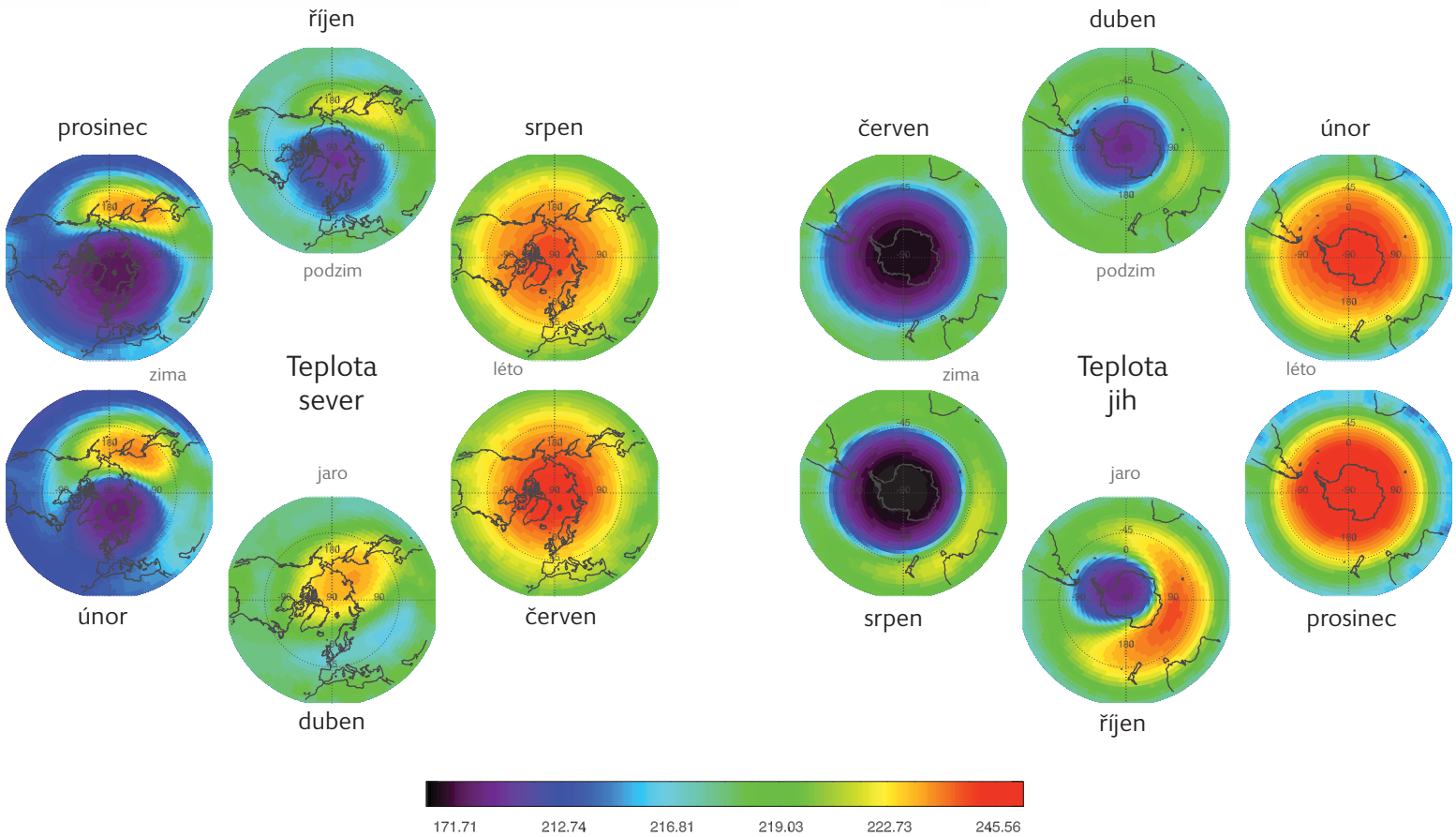
Stratosféra - geop. výšky ve 30 hPa (~24 km)

- **nižší stratosféra** - oblast významná pro chemické procesy spojené s ozonem
- **velké rozdíly mezi jihem a severem**, na jihu výrazný polární vír, na severu aleutská anomálie, během léta na severu oblast vysokého tlaku
- vzájemné ovlivnění s teplotami



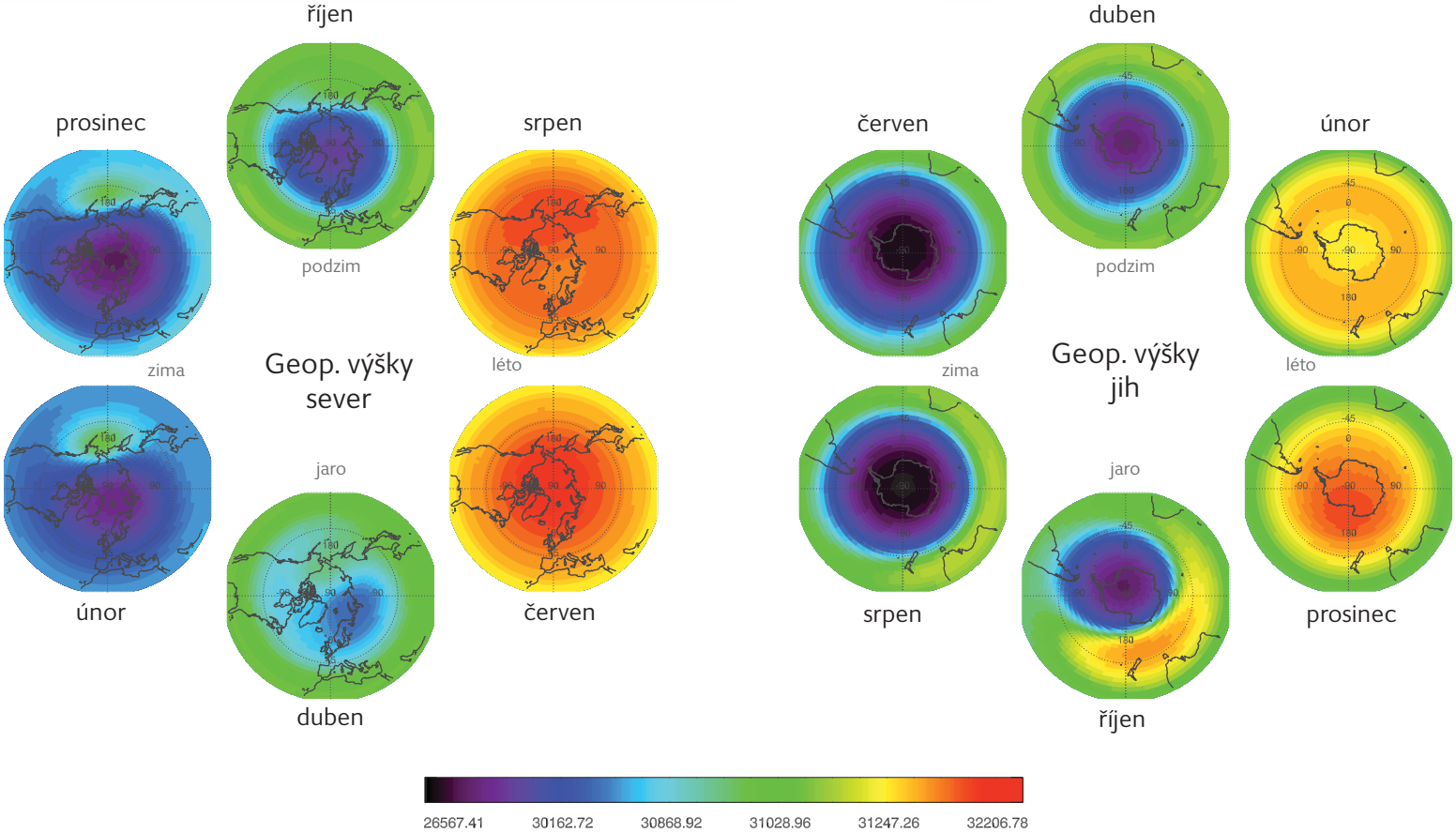
Stratosféra - teploty ve 30 hPa (~24 km)

- **na severu výrazná anomálie** v oblasti Aleut, **na jihu symetrický vír**
- významné rozdíly mezi S a J během zimy a jara - přítomnost anomálie na severu, perzistence studené oblasti na jihu, na jihu výraznější teploty



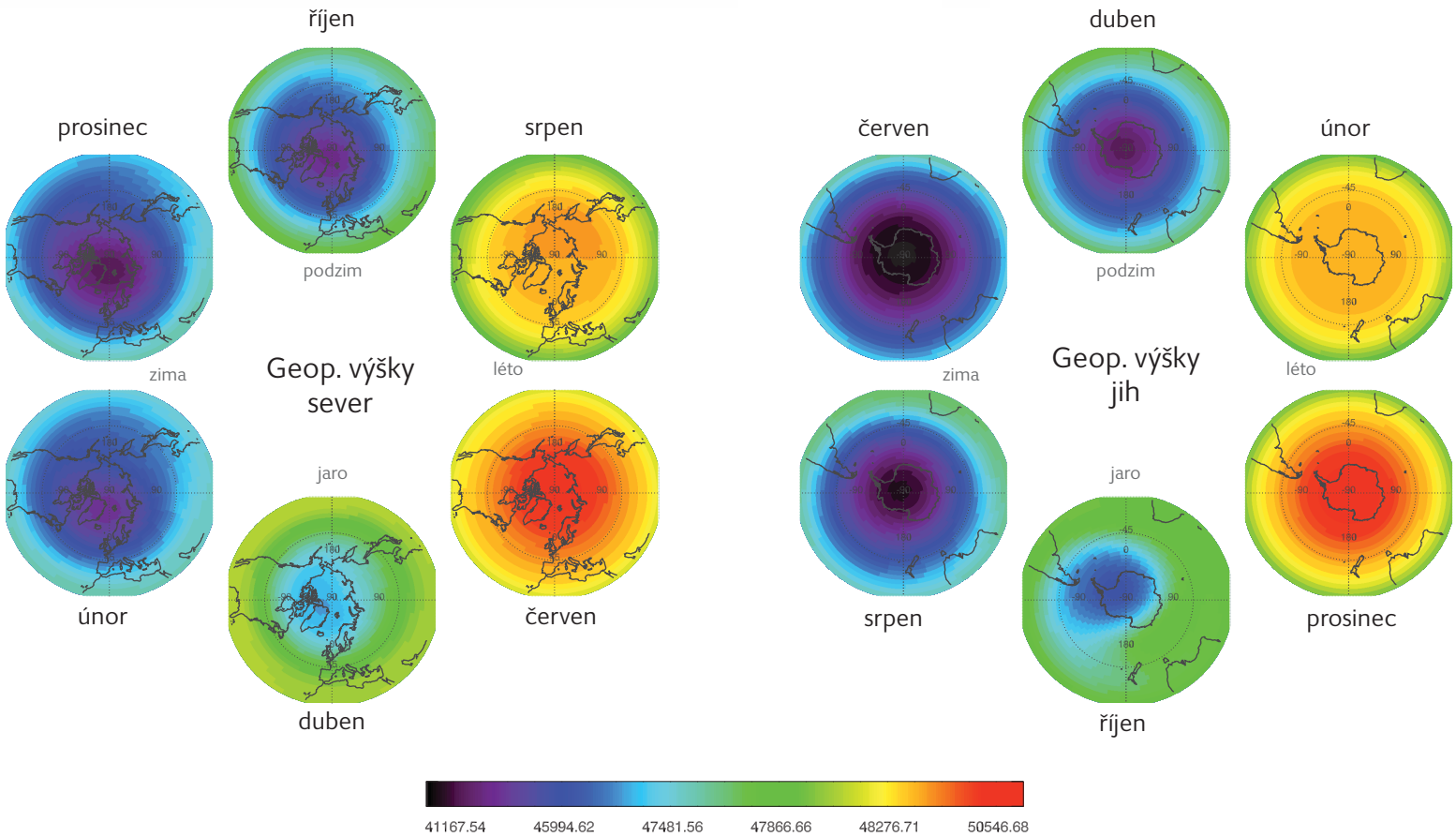
Stratosféra - geop. výšky ve 10 hPa (~31 km)

- **střední stratosféra**
- podobně jako v 30 hPa, anomálie na severu, rozdíly v zimní a jarní cirkulaci, na severu během léta východní proudění



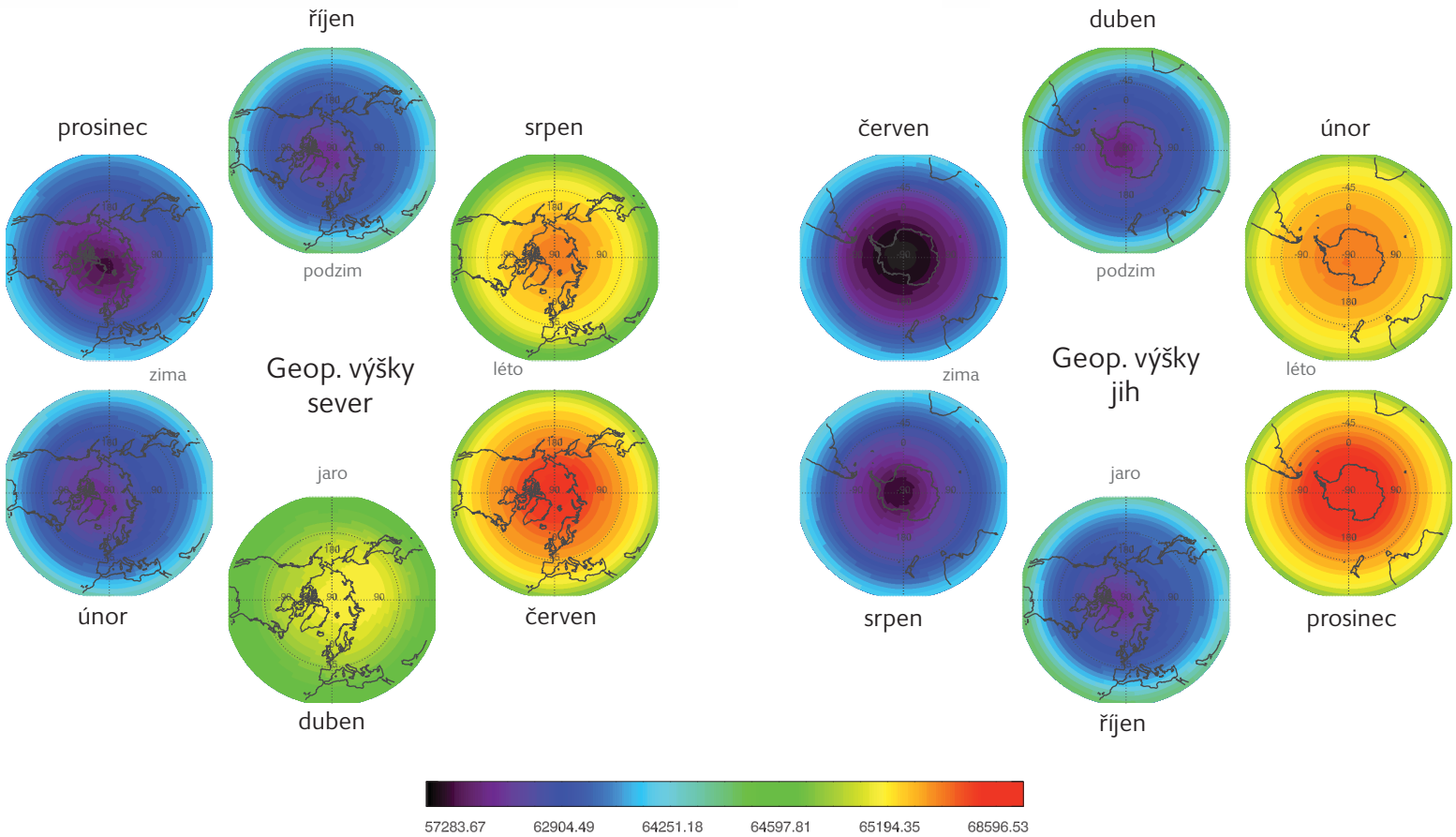
Stratosféra - geop. výšky ve 1 hPa (~48 km)

- **vysoká stratosféra**, oblast stratopauzy i mezosféry
- asymetrie proudění na severu je již nevýrazná
- proudění na severu a na jihu více podobné, na jihu větší gradienty a výraznější cirkulace



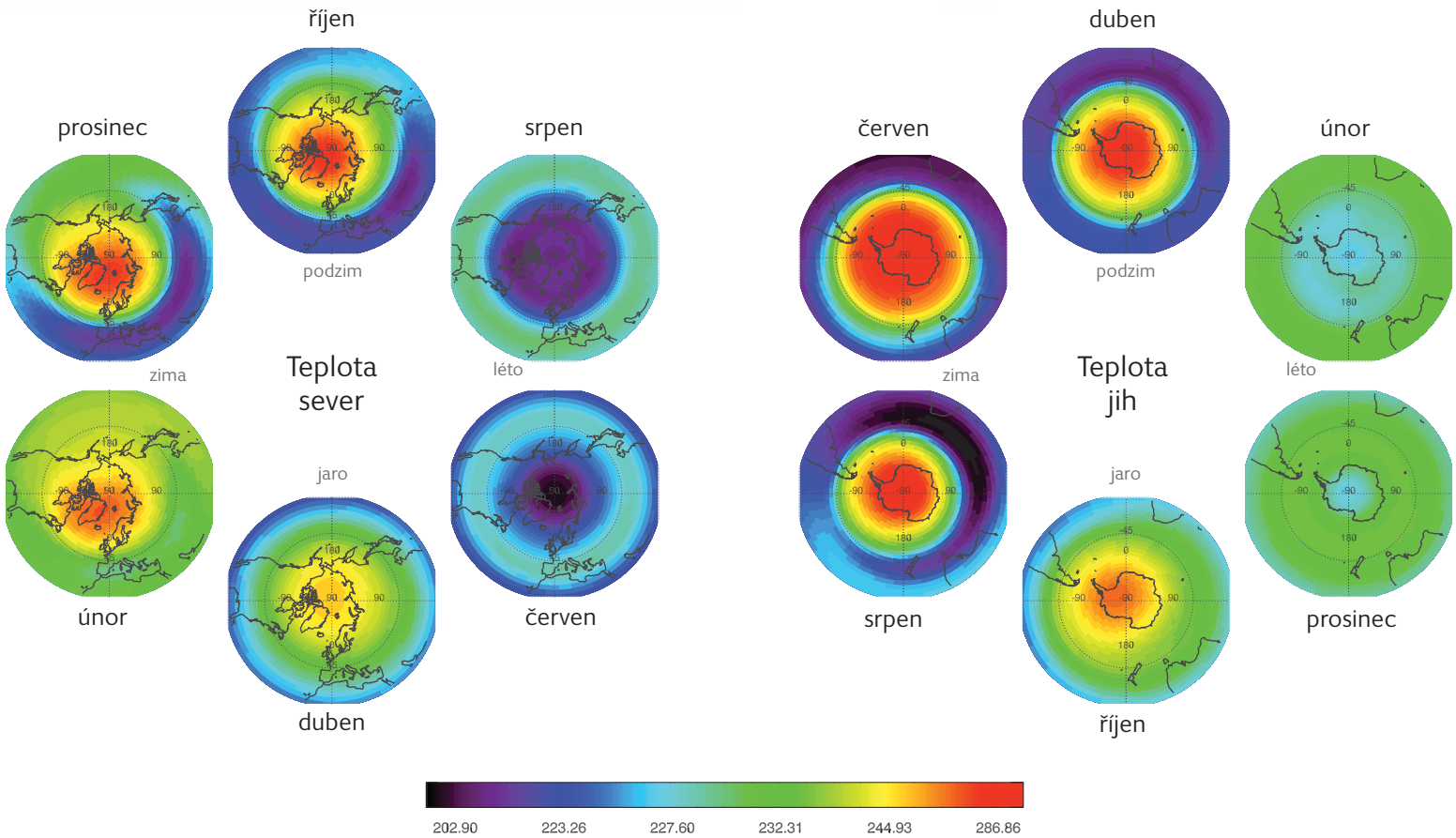
Stratosféra - geop. výšky v 0.1 hPa (~65.5 km)

- **mezosféra**
- podobně jako v nižších vrstvách
- v této hladině už ale není přímé ovlivnění pole teplot - ty jsou dány velkoprostorovou cirkulací a působením atmosférických vln



Stratosféra - teploty v 0.1 hPa (~65.5 km)

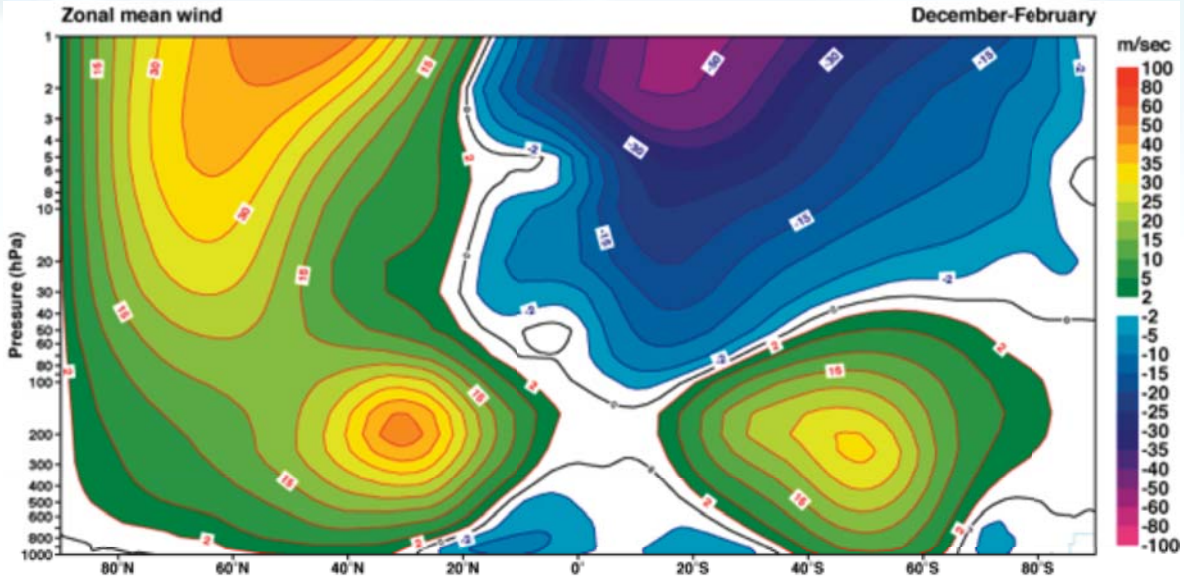
- **mezosféra**
- naprostá proměna podmínek, **minima** během letního období, **maxima** v zimě
- souvislost s působením atmosférických vln a velkoprostorovou cirkulací

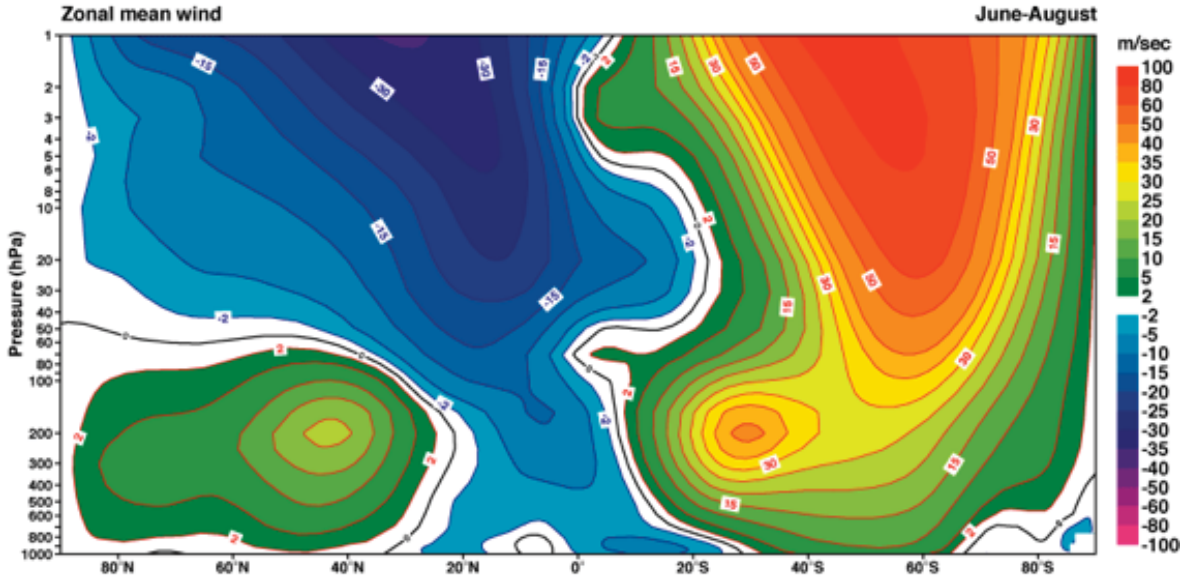


Stratosféra - vertikální profil zonálního proudění

- **vertikální profily** zima na severní a jižní polokouli
- jasné rozlišení letní a zimní hemisféry
- **zimní cirkulace** jasně západní
- **letní cirkulace** jasně východní
- **hemisférické rozdíly** v symetrii a persistenci

zdroj: http://old.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/docs/section_D25/parameter_zmzwsp.html

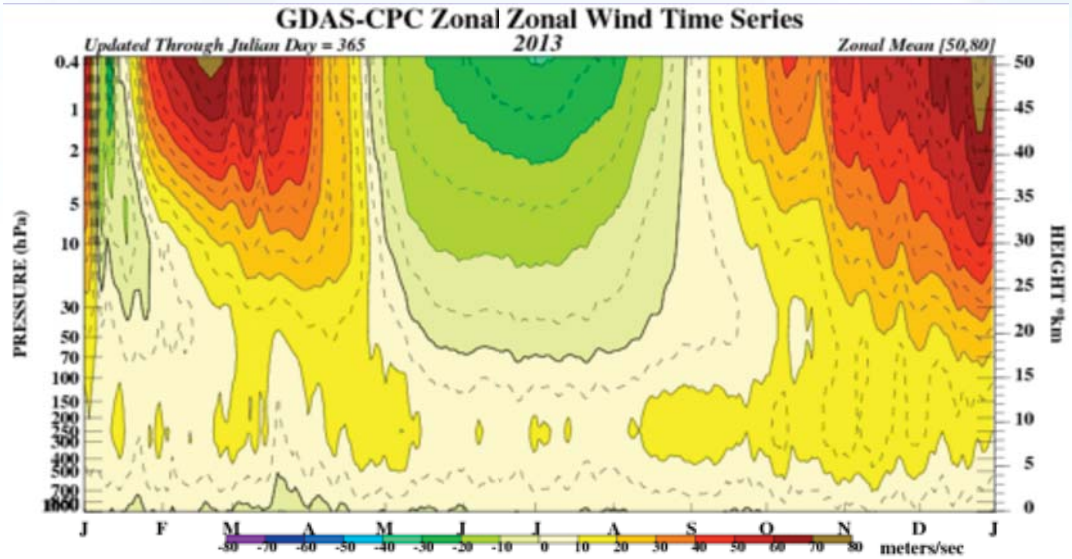


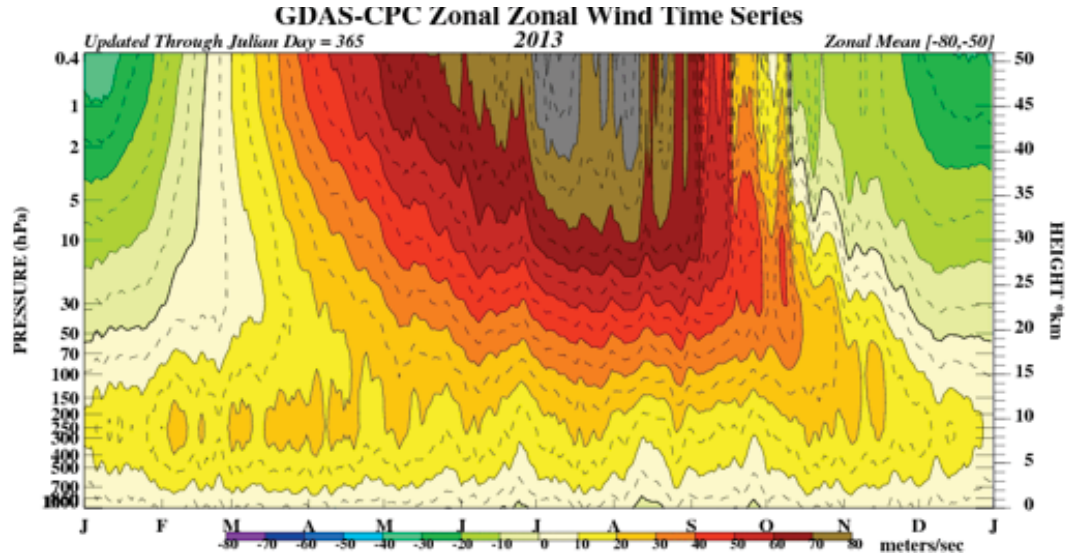


Stratosféra - vertikální profil zonálního proudění

- **časové průběhy** zonálního proudění v severních a jižních polárních oblastech během 2013
- jasné rozlišení letní a zimní cirkulace
- **zimní cirkulace** západní
- **letní cirkulace** východní
- stratosférické oteplení na severu - východní anomálie
- hemisférické rozdíly v symetrii a persistenci

zdroj: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/strat-trop/

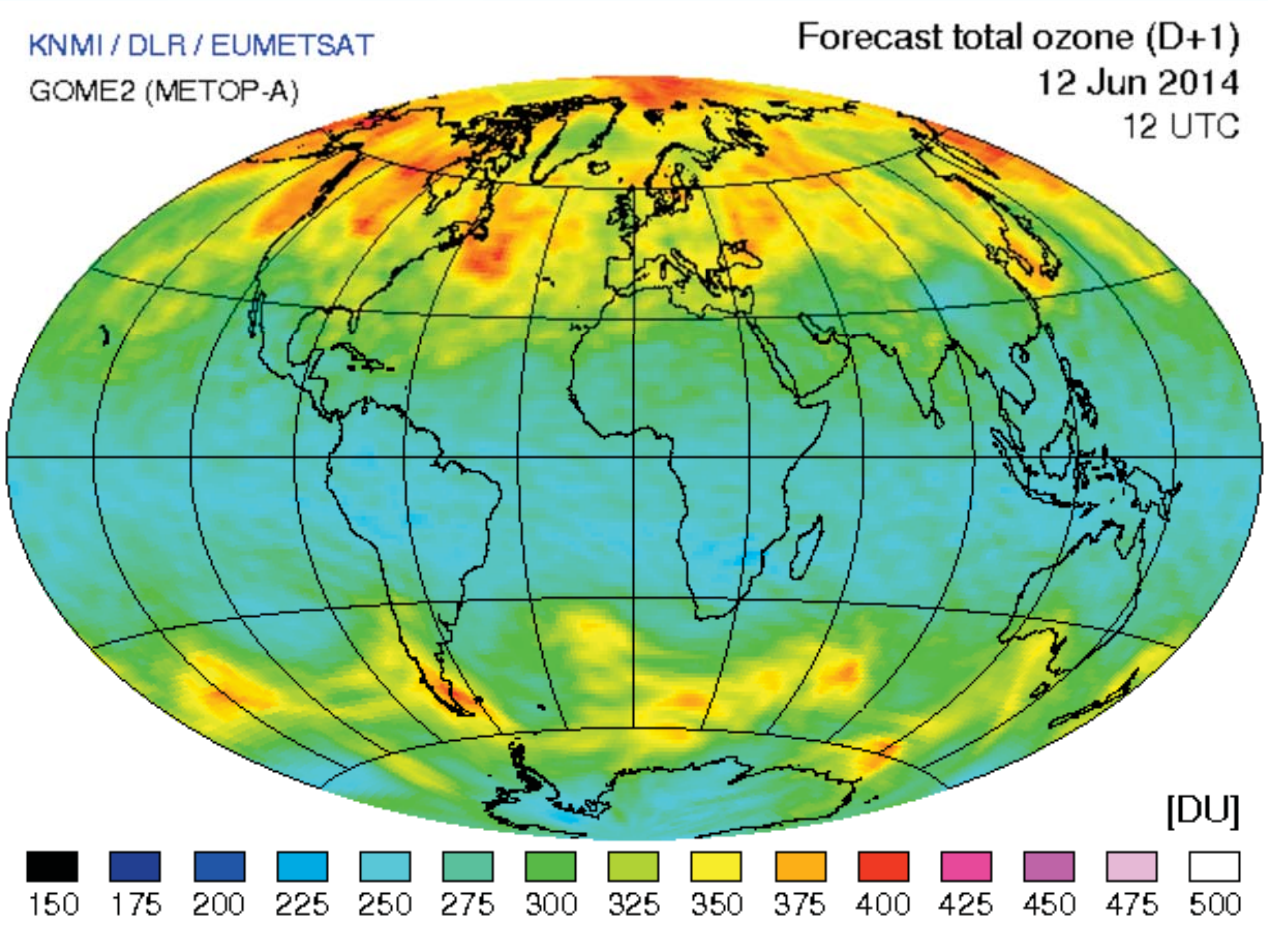




Stratosféra - velkoprostorová cirkulace

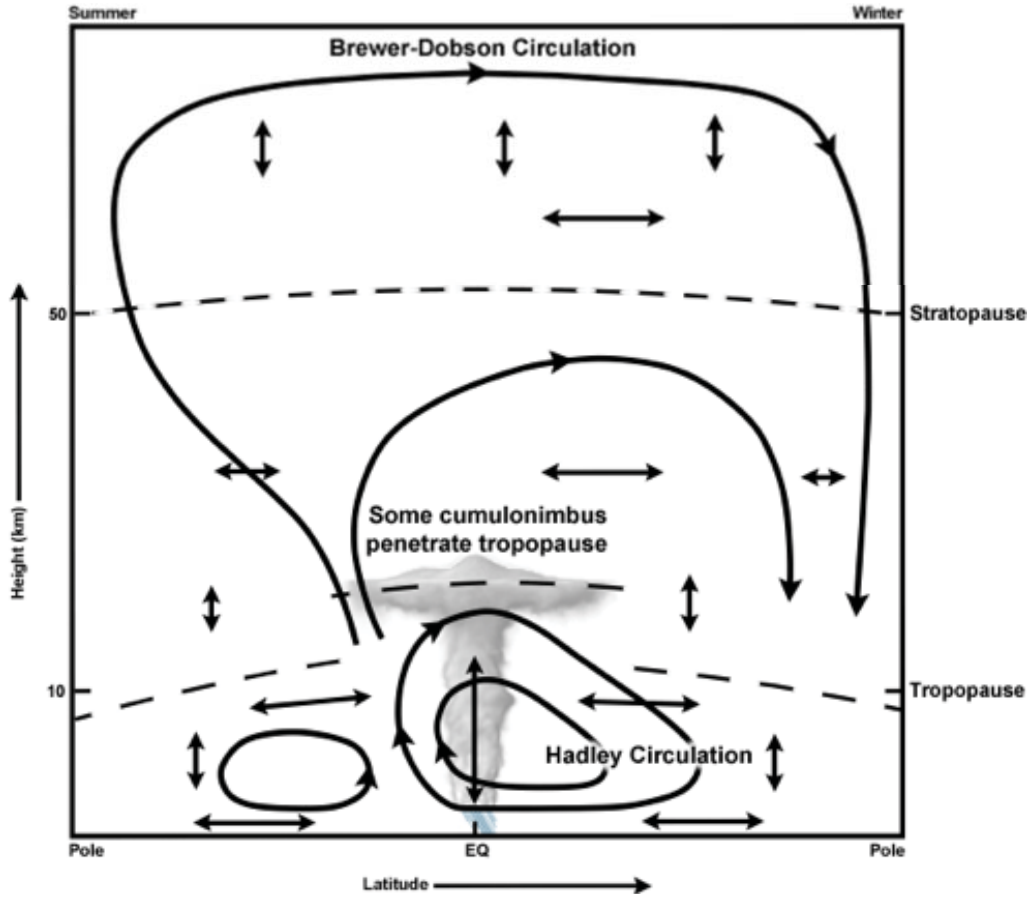
- **ozon** vzniká zejména v tropických oblastech díky maximu dopadajícího záření
- v poli celkového ozonu je ale v tropech minimum
- jak to?

zdroj: http://www.temis.nl/protocols/O3global.html



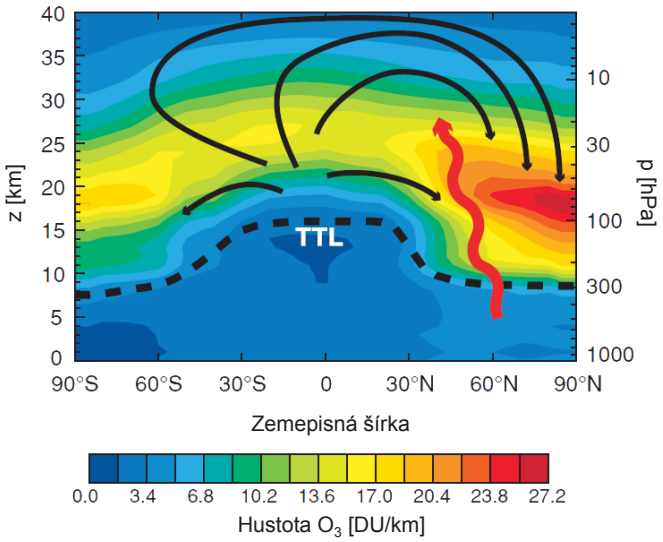
Stratosféra - Brewer-Dobson cirkulace

- Alan **Brewer** v roce 1949 a následně Gordon **Dobson** v roce 1956 navrhli model cirkulace vysvětlující také paradox minima koncentrací ozonu v tropech
- tato velkoprostorová cirkulace **se skládá z výstupných pohybů v tropických oblastech a sestupných pohybů ve vysokých zeměpisných šířkách**
- **výrazný roční chod**, více intenzivní na zimní polokouli
- cirkulace vzniká díky působení atmosférických vln
- díky této cirkulaci je ozon vznikající v tropech globálně redistribuován

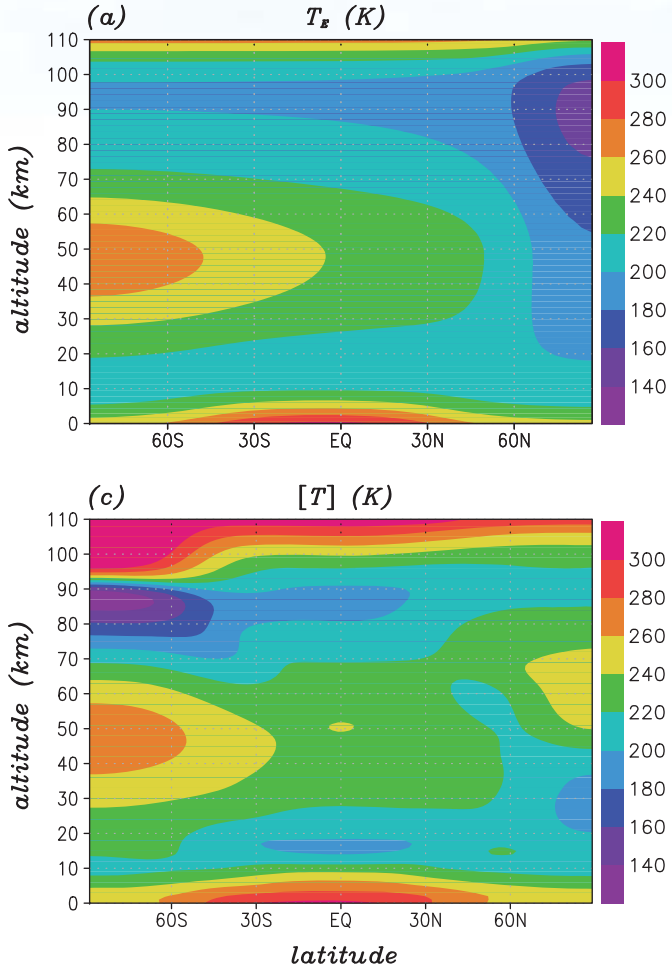


Stratosféra - Brewer-Dobson cirkulace

- tato velkoprostorová cirkulace **se skládá z výstupných pohybů v tropických oblastech a sestupných pohybů ve vysokých zeměpisných šířkách**
- díky této cirkulace je ozon vznikající v tropech globálně redistribuován
- cirkulace významně ovlivňuje pole teplot
- výstupné pohyby vedou k ochlazení daných oblastí, sestupné k oteplení



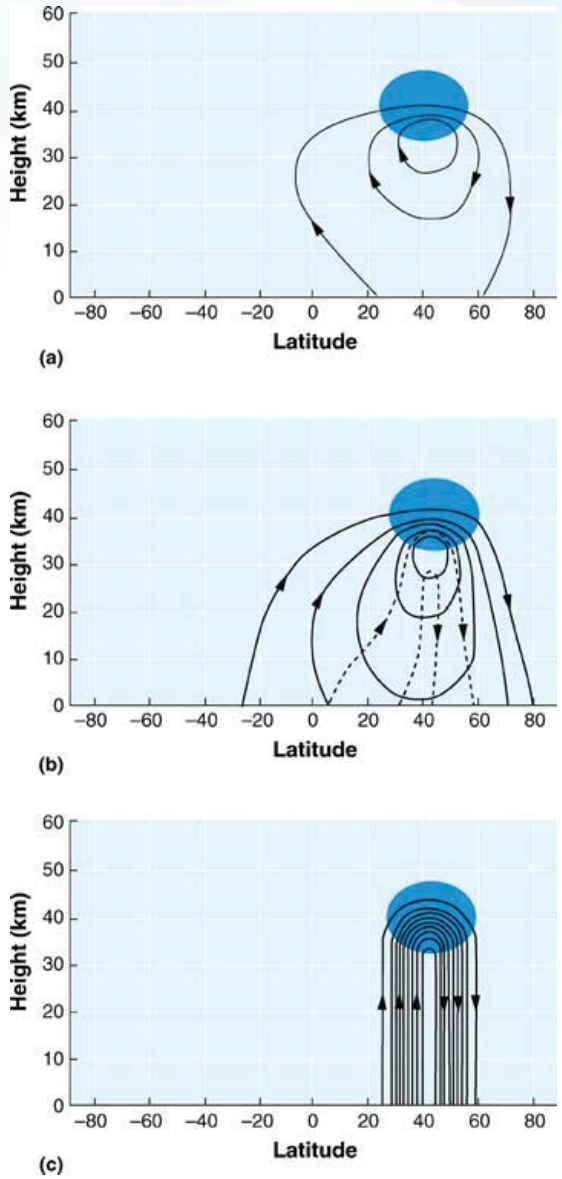
zdroj: Kupčihová Z. 2014



zdroj: Becker, 2012

Stratosféra - Brewer-Dobson cirkulace a atmosférické vlny

- cirkulace **vzniká díky působení atmosférických vln**
- vertikálně se šířící vlny z mimotropické troposféry
- Rossbyho, gravitační... planetární
- **ve vyšších hladinách disipují/rozpadají se**
- přenos energie - přenos zonální hybnosti
- nelokální působení

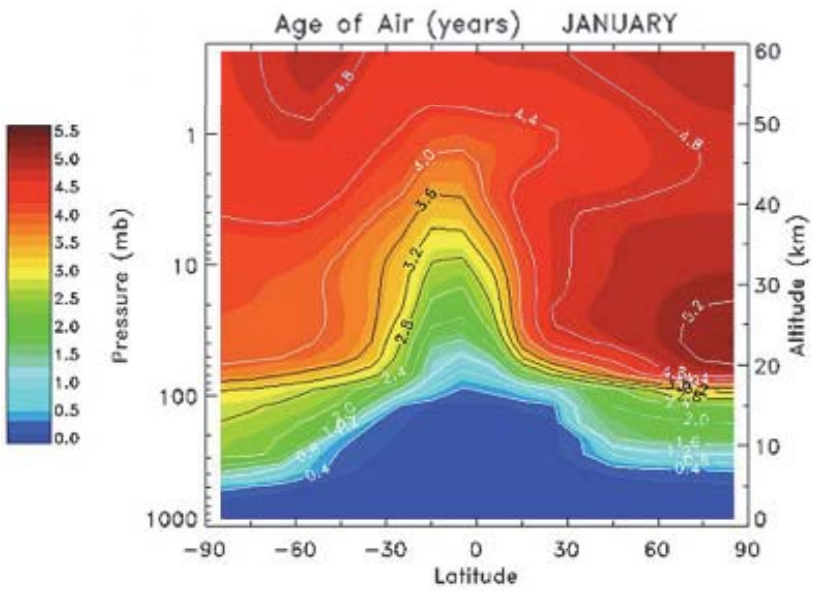


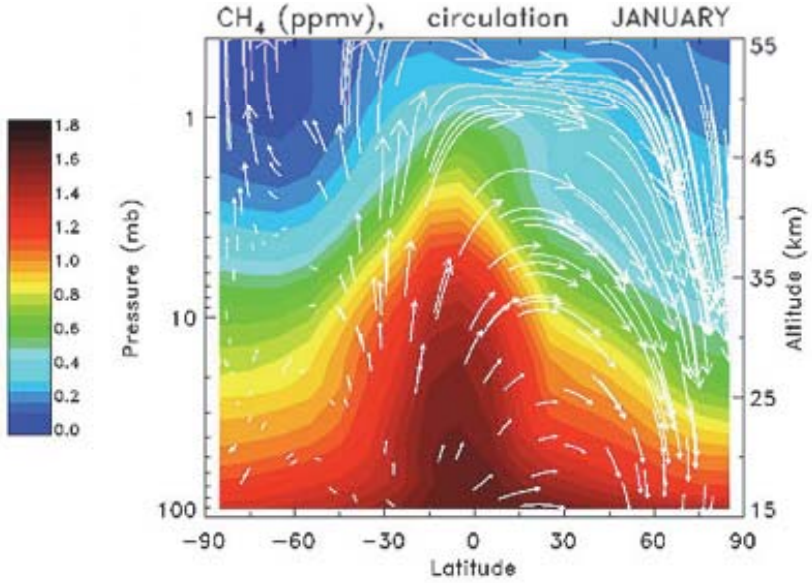
zdroj: Haynes P. 2005

Stratosféra - Brewer-Dobson cirkulace a atmosférické vlny

- cirkulace vzniká díky působení atmosférických vln
- **výrazný roční chod**
- vlny se mohou šířit skrze západní proudění a vlnová aktivita je tedy výrazná **hlavně v zimě**

- graf stáří vzduchu a koncentrací CH_4



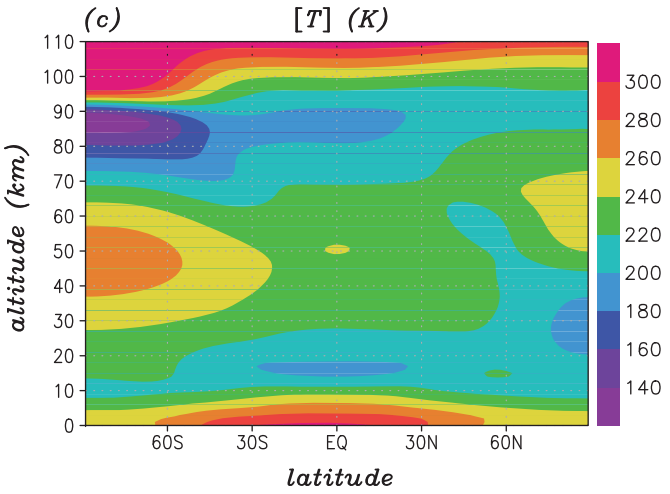


zdroj: http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/ozone/class/Chap_6/

Stratosféra - Brewer-Dobson cirkulace a atmosférické vlny

- **díky BD cirkulaci** proměna vertikálního gradientu teploty v mezosféře
- nízké teploty nad letním pólem díky výstupným pohybům buzených nad zimní hemisférou

- vlnové působení a velkoprostorová cirkulace představují mechanismus **komunikace mezi atmosférickými vrstvami**
- mechanismus, jehož ovlivněním se projevují právě fenomény SSC a QBO



zdroj: Becker, 2012

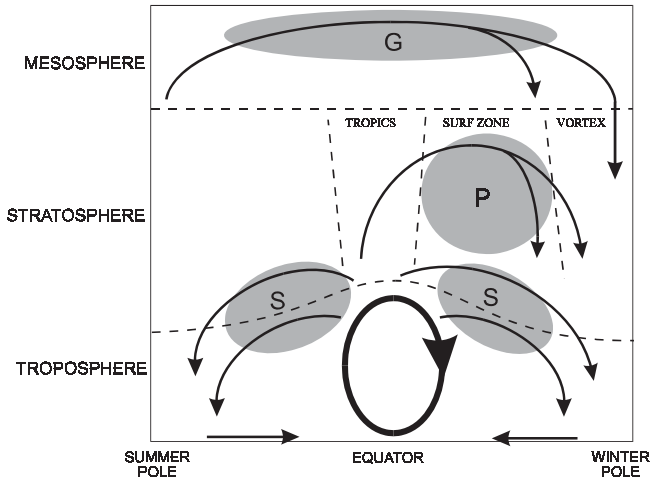
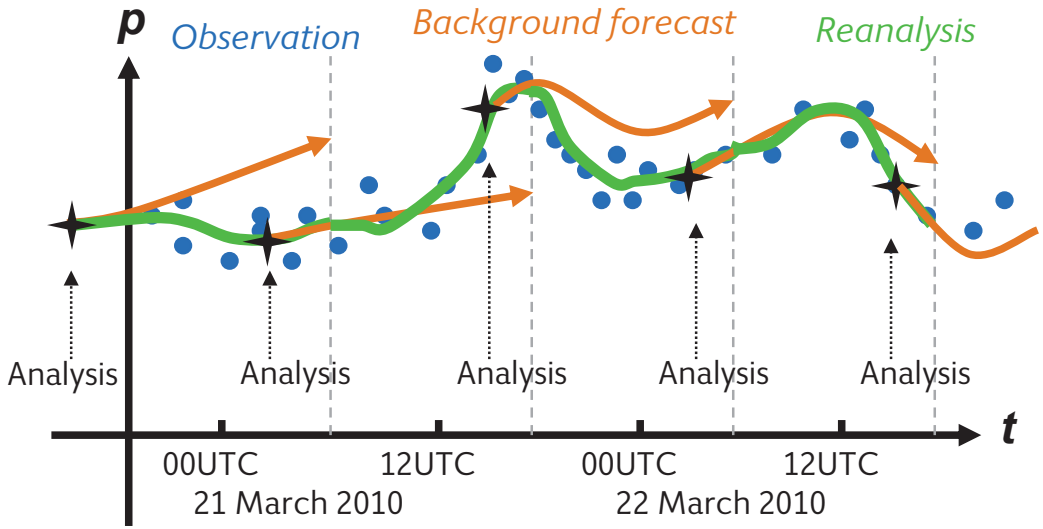


Figure 2. Schematic of the residual mean meridional circulation in the atmosphere. The heavy ellipse denotes the thermally-driven Hadley circulation of the troposphere. The shaded regions (labelled "S", "P", and "G") denote regions of breaking waves (synoptic- and planetary-scale waves, and gravity waves, respectively), responsible for driving branches of the stratospheric and mesospheric circulation.

zdroj: Plumb, 2002

Vliv QBO a SSC - použitá data a metody

- nedostatek souvislých měření (sondáže, satelity...)
- doplňování časových řad, přepočet do pravidelné sítě
- **využití reálných měření v kombinaci s numerickou simulací**
- výsledkem souhrn **tzv. reanalýz** - globálně pouze několik hlavních setů
- využito zejména MERRA reanalýz
- použito vícenásobné ne/lineární regrese a kompozitní analýzy

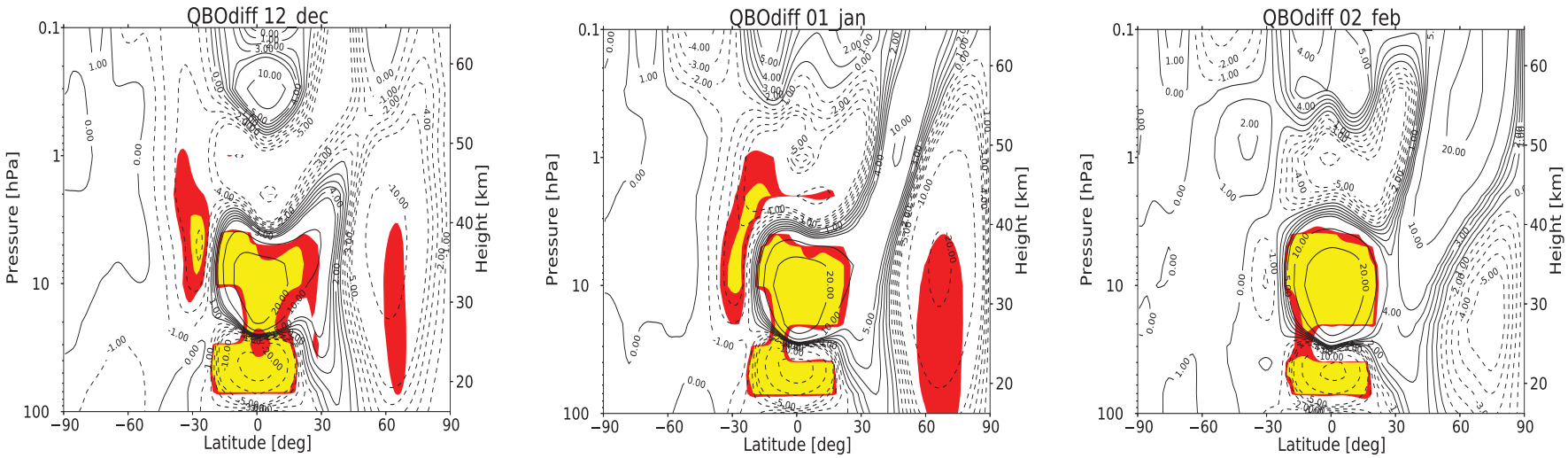


zdroj: http://old.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological_presentations/2013/DA2013/Poli/Poli_2013_TC_Reanalysis_with_notes.pptx

Vliv QBO - výsledky analýzy

- střídání západních a východních anomálií na rovníku
- **vliv na teplotu, ale i např. na transport ozonu skrze celou stratosféru**
- signifikantní ovlivnění polární cirkulace

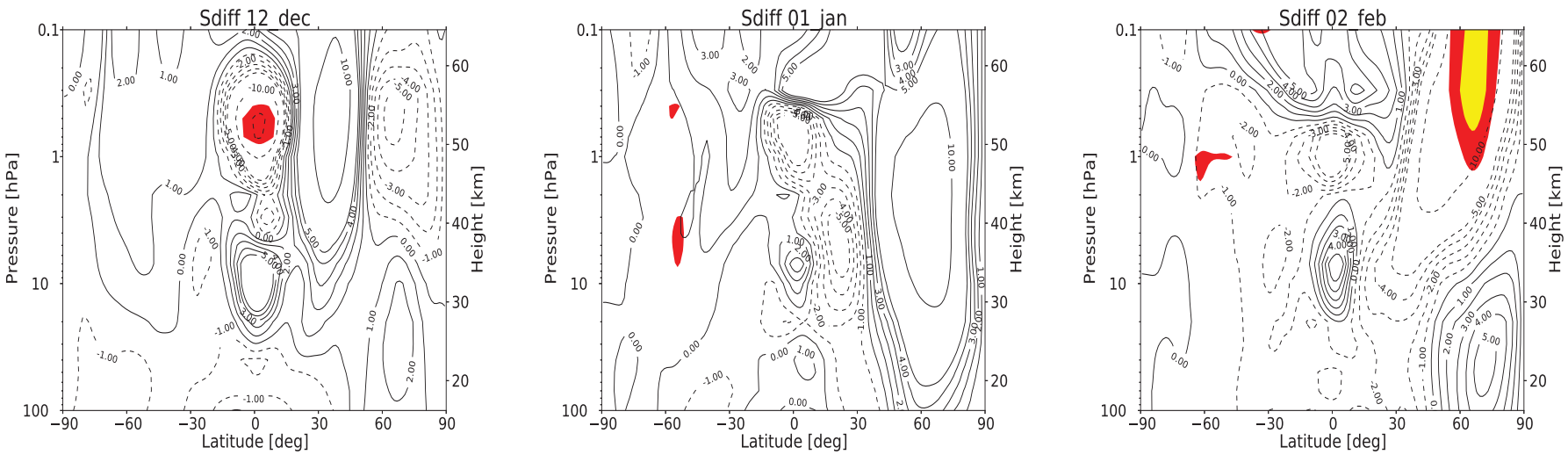
- extrahovaný vliv QBO na zonální cirkulaci během severní zimy



Vliv SSC - výsledky analýzy

- **zesílení západního proudění kolem subtropické stratopauzy** (hlavně v lednu)
- **postup této anomálie níže a směrem k pólu**
- instabilita polárního víru se objevuje koncem polární zimy ve vyšších vrstvách
- výsledkem je slabší BD cirkulace během maxima solární aktivity a především na počátku polární zimy

- extrahovaný vliv SSC na zonální cirkulaci během severní zimy



Kombinovaný vliv SSC a QBO

- **začátkem polární zimy** je QBO ve východní fázi hlavním zdrojem instability polárního víru (východní anomálie)
- v zásadě nehledě na fázi solárního cyklu

- **na konci zimy** se jako destabilizující prvek projevuje QBO v západní fázi zejména v kombinaci s maximem sluneční aktivity
- výsledek je pozdější nástup náhlého stratosférického oteplení

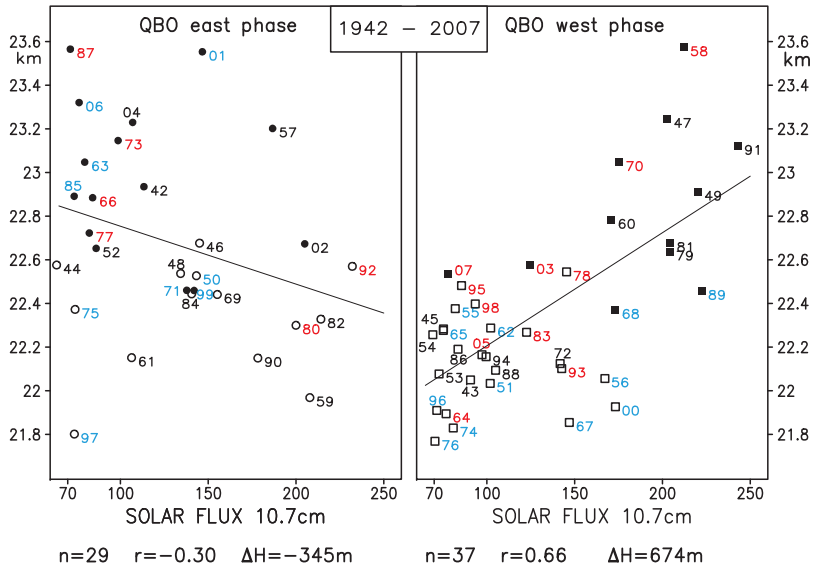


Fig. 4. Scatter diagrams of the monthly mean 30-hPa geopotential heights (geopot.km) in February at the North Pole (1942 till 2007), plotted against the 10.7 cm solar flux. Left: Circles: years in the east phase of the QBO ($n = 29$). Right: Squares: years in the west phase ($n = 37$). The numbers indicate the respective years, with WE in red and CE in blue. Filled symbols denote MMWs. r = correlation coefficient; ΔH gives the mean difference of the heights (geopot.m) between solar maxima (200 s.flux units) and solar minima (70 s.flux units). (Reconstructions: 1942 till 1947; NCEP/NCAR re-analyses: 1948 till 2007.) (van Loon and Labitzke (1994), updated.)

zdroj: Labitzke and Kunze, 2009

Stratosféra a významné fenomény

- analýzy ukazují na **významný vliv QBO i SSC**
- výsledky nelze brát jako jednoznačné pravidlo
- **vliv dalších fenoménů** i antropogenních činitelů
- **dopad na další části atmosféry** včetně např. dlouhodobého režimu počasí
- aktuální výzkum zaměřený na vlnové aktivity, tzv. coupling atmosférických vrstev a podmínky střední atmosféry

Použitá a doporučená literatura

- Baldwin, M.P., et al., (2001) The quasi-biennial oscillation, Rev. Geophys., 39, 179–229
- Becker E. (2011), Dynamical control of the middle atmosphere. Space Sci. Rev. doi:10.1007/s11214-011-9841-5
- Dessler, A. E. (2000) The chemistry and physics of stratospheric ozone, Academic Press, San Diego
- Chiodo, G., Calvo, N., Marsh, D. R., and Garcia-Herrera, R. (2012): The 11 year solar cycle in transient WACCM3.5 simulations, J. Geophys. Res., 117, D06109, doi:10.1029/2011JD016393
- de Wit, T.D., Watermann, J. (2010) Solar forcing of the terrestrial atmosphere. C. R. Geosci. 342(4 – 5), 259 – 272. doi: 10.1016/j.crte.2009.06.001
- Haynes, P. (2005), Stratospheric dynamics, Annu. Rev. Fluid Mech., 37, 263–293, doi:10.1146/annurev.fluid.37.061903.175710
- Harvey, V. L., R. B. Pierce, T. D. Fairlie, and M. H. Hitchman (2002), A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones, J. Geophys. Res., 107(D20), 4442, doi:10.1029/2001JD001471.
- Kupčihová, Z. (2014): Kvazi-dvouletá oscilace zonálních větrů v tropické stratosphere, bakalářská práce, MFF UK
- Kuchař, A. (2013): Vertikální proměnlivost vlivu jedenáctiletého slunečního cyklu ve střední a vyšší atmosphere, diplomová práce, MFF UK
- Kuchař, A. (2011): Klimatické charakteristiky vyšších vrstev atmosféry, bakalářská práce, MFF UK
- Labitzke, K., and H. van Loon (1999): The Stratosphere: Phenomena, History, and Relevance. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 179 pp.
- Larkin, A., J. D. Haigh, and S. Djavidnia (2000), The effect of solar UV radiation variations on the Earth's atmosphere, Space Sci. Rev., 94, 199–214, doi:10.1023/A:1026771307057
- Labitzke, K., and M. Kunze (2009), On the remarkable Arctic winter in 2008/2009, J. Geophys. Res., 114, D00I02, doi:10.1029/2009JD012273.
- Manzini, E. (2009), ENSO and the stratosphere, Nat. Geosci., 2, 749–750.
- Mohanakumar K (2008) Stratosphere troposphere interaction: an introduction. Springer Science + Business Media B. V.
- Plumb, R.A. (2002): Stratospheric transport. J. Met. Soc. Japan , 80, 793-809
- Waugh, D. W. & Polvani, L. M. (2010) Stratospheric polar vortices. Geophys. Monog. Ser. 190, 43–58