

Standardní stratosféra

průměrné podmínky, cirkulace a náhlá stratosférická oteplení



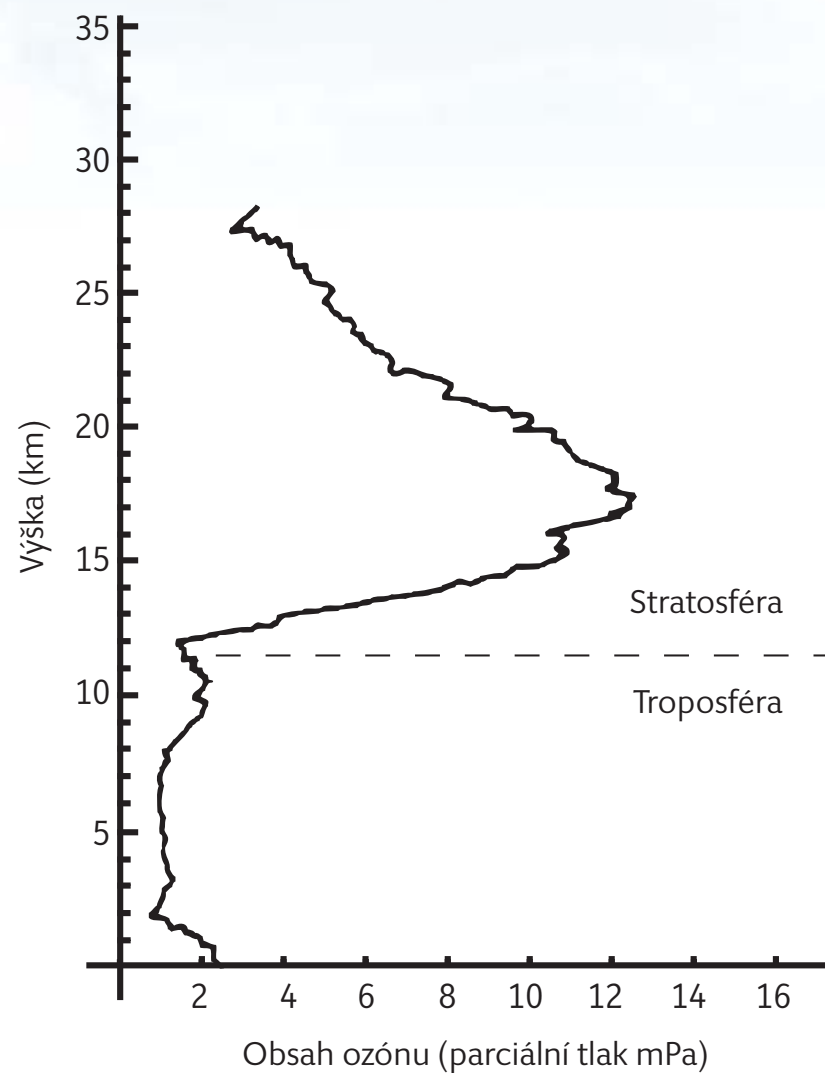
Petr Pišoft

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



Polární stratosféra a ozón

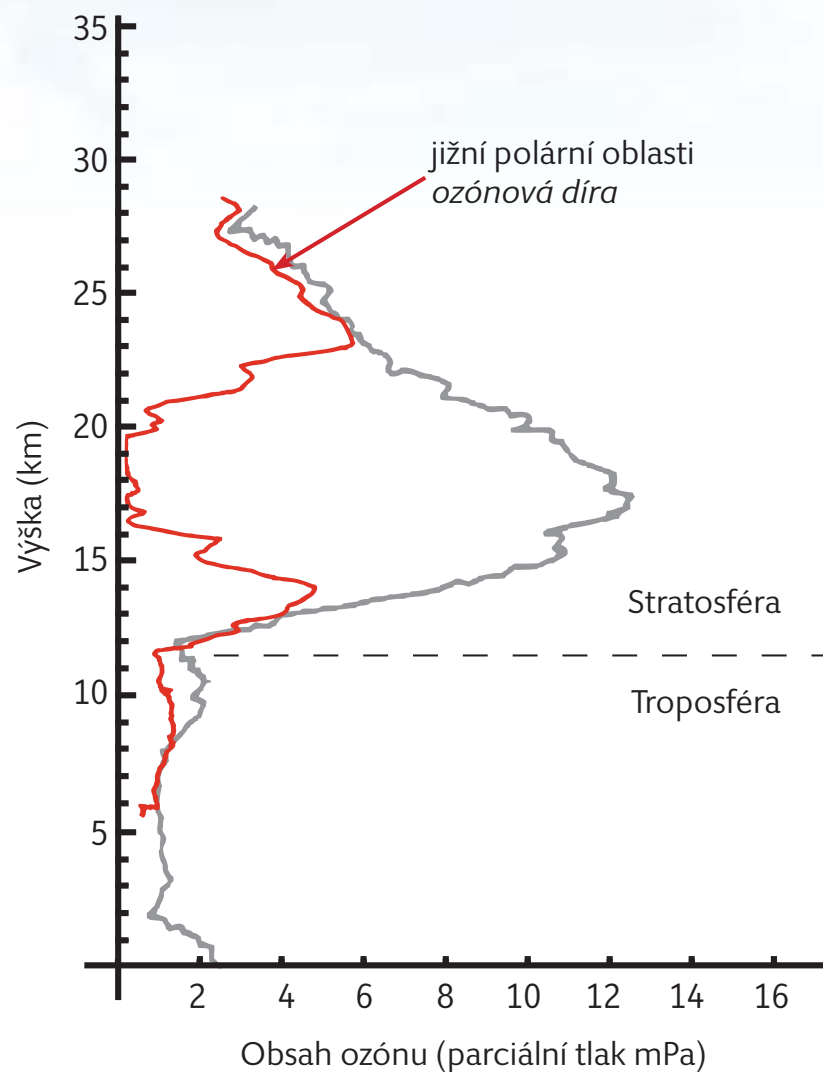
- maximum koncentrací v oblasti stratosféry - **ozónová vrstva**





Polární stratosféra a ozón

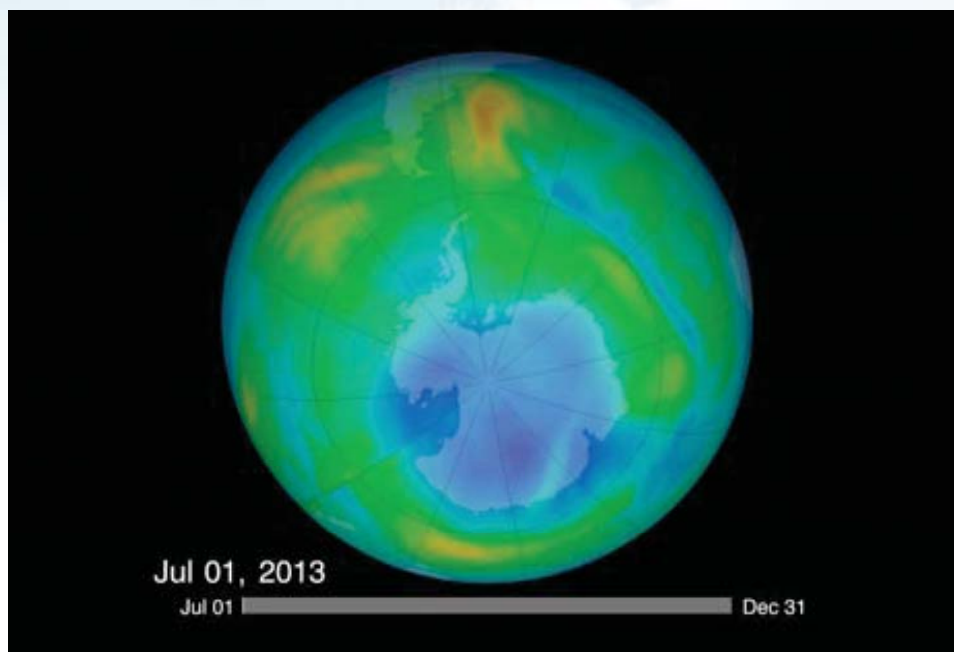
- maximum koncentrací v oblasti stratosféry - **ozónová vrstva**
- **jarní podmínky jižní polární stratosféry** - vznik *ozónové díry*
- destrukce ozónu v oblasti maxima koncentrací





Polární stratosféra a ozón

- jarní podmínky jižní polární stratosféry - **vznik ozónové díry**



zdroj: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

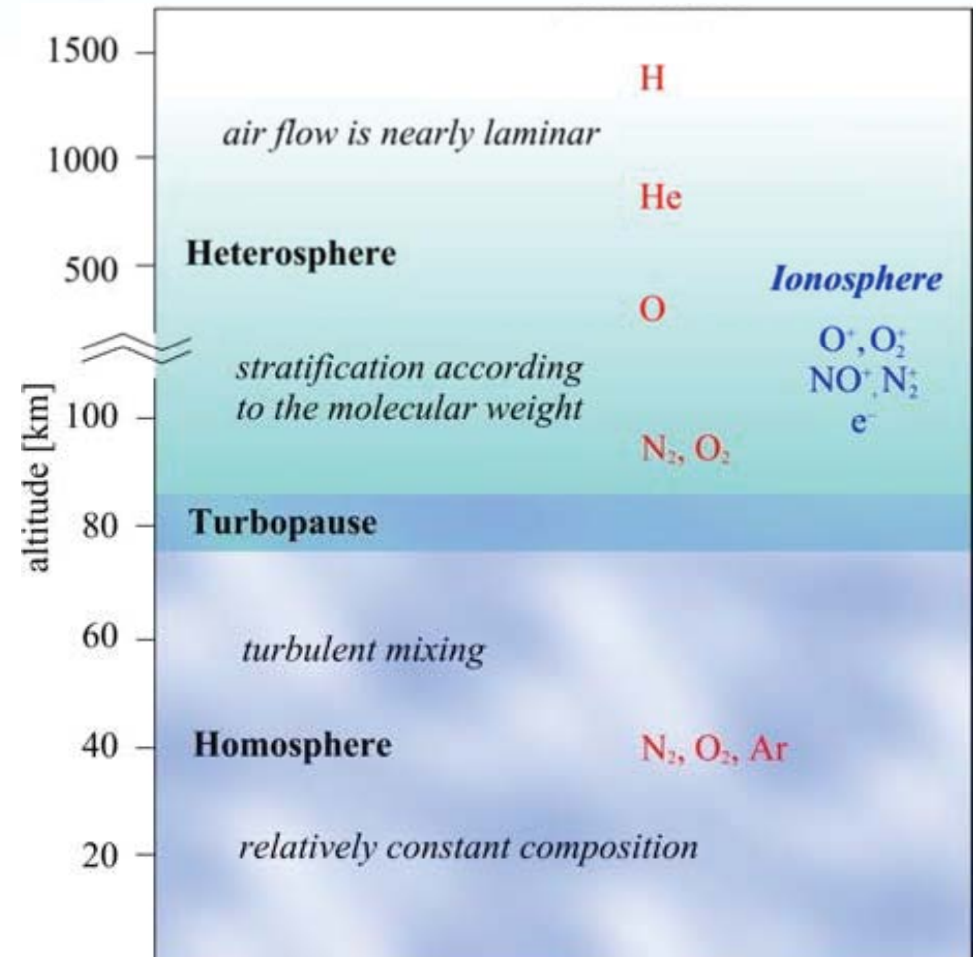


- **rozsah 2013** (7. 9. - 13. 10.): $21.0 \cdot 10^6 \text{ km}^2$
- **max. rozsah** (2006): $26.6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$



Vertikální dělení atmosféry

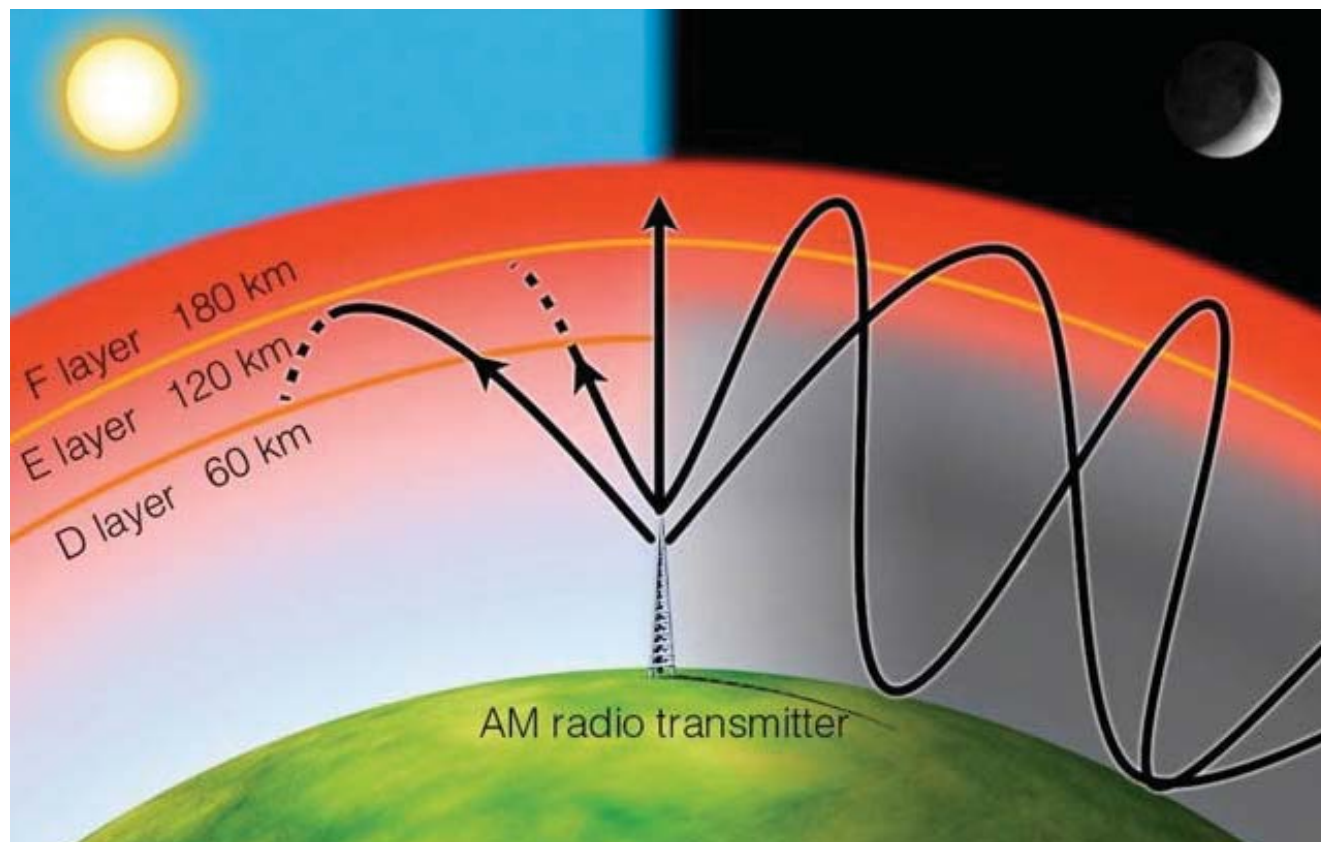
- záleží na zvoleném měřítku - **promíchání**, vodivost, teplota
- **homosféra** - nemění se podstatně objemové zastoupení plynů, zasahuje do výšky kolem 90 km, atomy a molekuly jsou díky turbulenci promíchány a rovnoměrně zastoupeny, od heterosféry oddělena homopauzou (turbopauzou)
- **heterosféra** - atomy a molekuly jsou zde zastoupeny podle své poměrné hmotnosti. Výše převládají atomy a lehké prvky. Ve spodní části heterosféry převládají ještě molekuly, výše pak atomy a ionty.





Vertikální dělení atmosféry

- záleží na zvoleném měřítku - promíchání, **vodivost**, teplota
- **neutrosféra** - část atmosféry od zemského povrchu do výše asi 60 km, v níž ionizace molekul vzduchu je tak malá, že vzduch lze považovat za elektricky nevodivé prostředí a nepůsobí odraz rádiových vln. Od ionosféry je oddělena neutropauzou.
- **ionosféra** - elektricky vodivá atmosférická vrstva. Ionosféru tvoří v ionosféře až 3 % procenta vzduchové hmoty. Ionosféra je významná například z hlediska přenosu rádiových vln

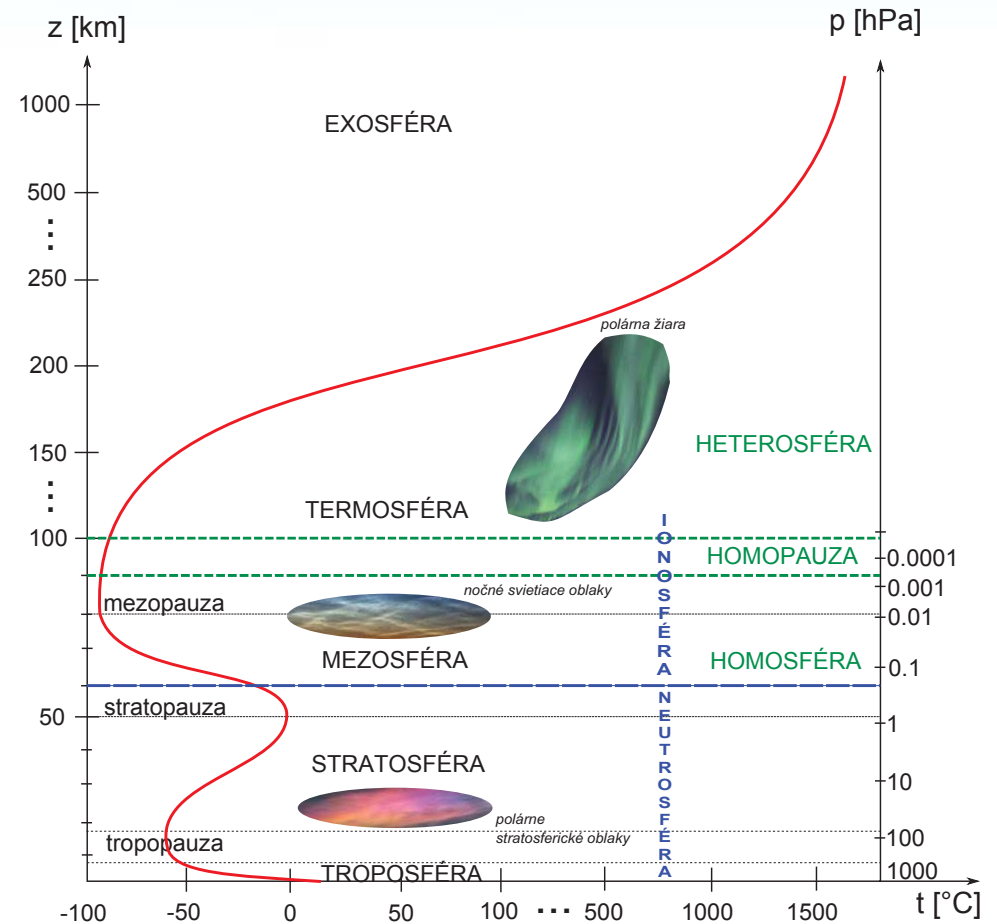


Vertikální dělení atmosféry

- záleží na zvoleném měřítku - promíchání, vodivost, **teplota**
- dělení **dle vertikálního gradientu teploty**
- vydělení pěti základních vrstev - troposféra, stratosféra, mezosféra, termosféra a exosféra

- **troposféra** - nejnižší vrstva, obsahuje cca 80% atm. hmoty, teplo zejména od povrchu, teplota s výškou obecně klesá, oblast turbulence, prachu, vlhkosti a počasí, značně proměnlivá v čase i prostoru
- od stratosféry oddělena tropopauzou

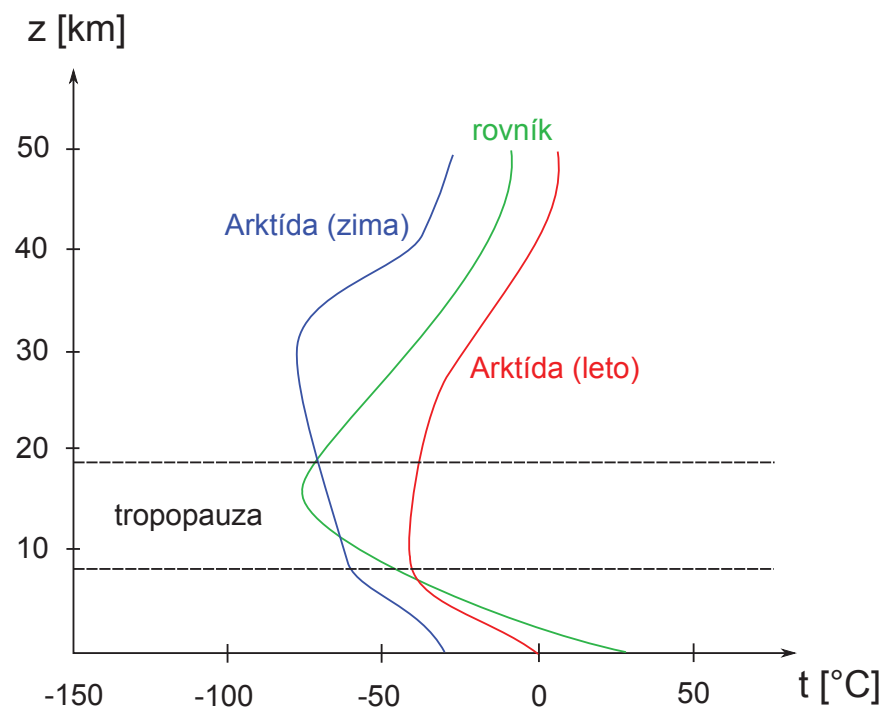
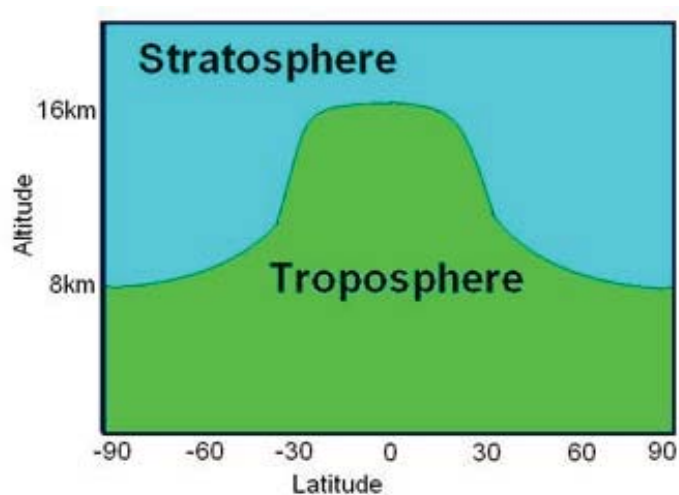
zdroj: Kupčihová Z. 2014





Tropopauza

- troposféra od stratosféry oddělena **tropopauzou**
- různé definice - termická, dynamická, chemická
- výška tropopauzy se mění v závislosti na roční době a geografické pozici
- **na rovníku** výše - cca 18 km/100 hPa a chladnější - cca -70°C
- **v polárních oblastech** níže - cca 8 km/300 hPa a teplejší - cca -50°C
- v zimě níže, v létě výše



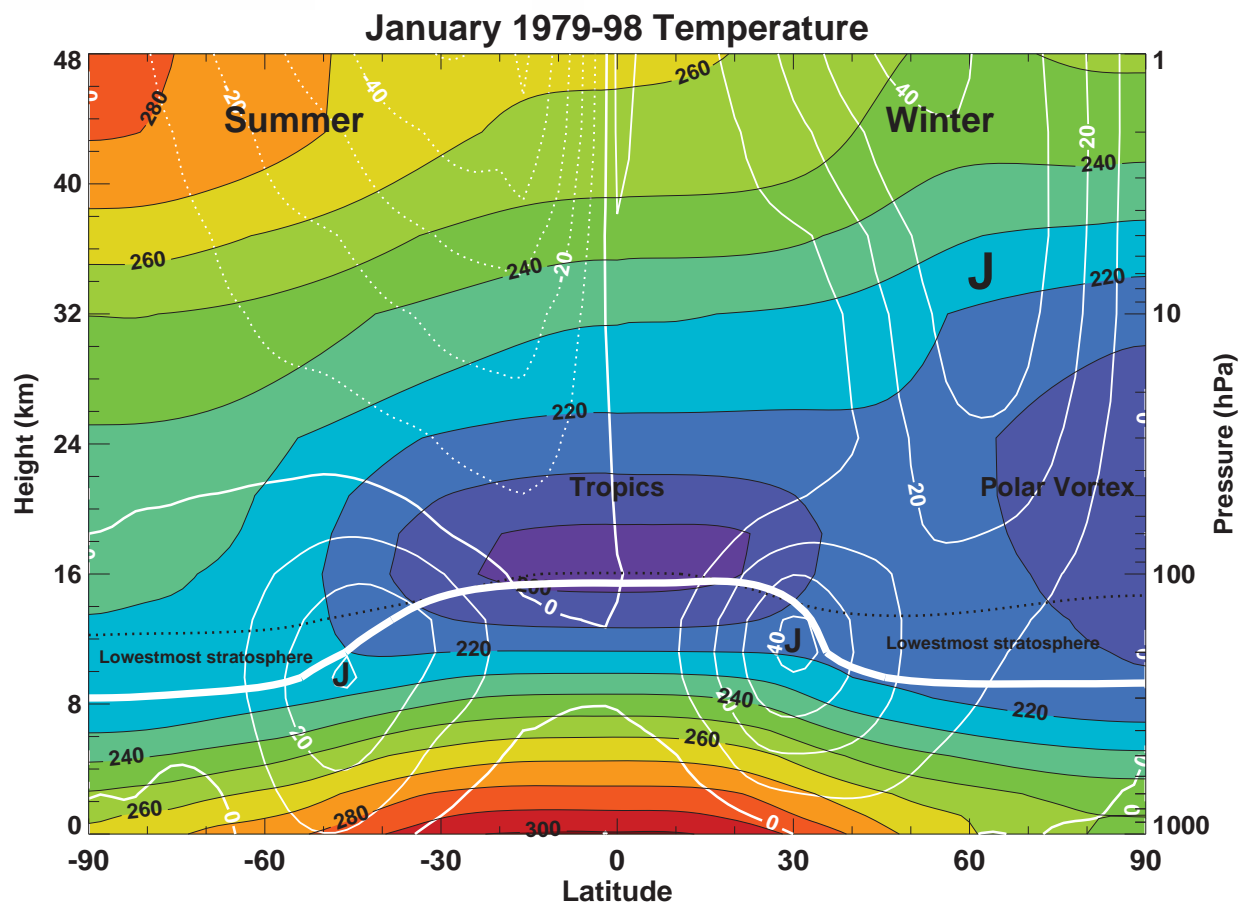
zdroj: Kupčihová Z. 2014



Tropopauza

- výška tropopauzy se mění v závislosti na roční době a geografické pozici
- **na rovníku** výše - cca 18 km/100 hPa a chladnější - cca -70°C
- **v polárních oblastech** níže - cca 8 km/300 hPa a teplejší - cca -50°C
- v zimě níže, v létě výše

zdroj: <https://cloud1.arc.nasa.gov/solve/overview/solve.pr.html>

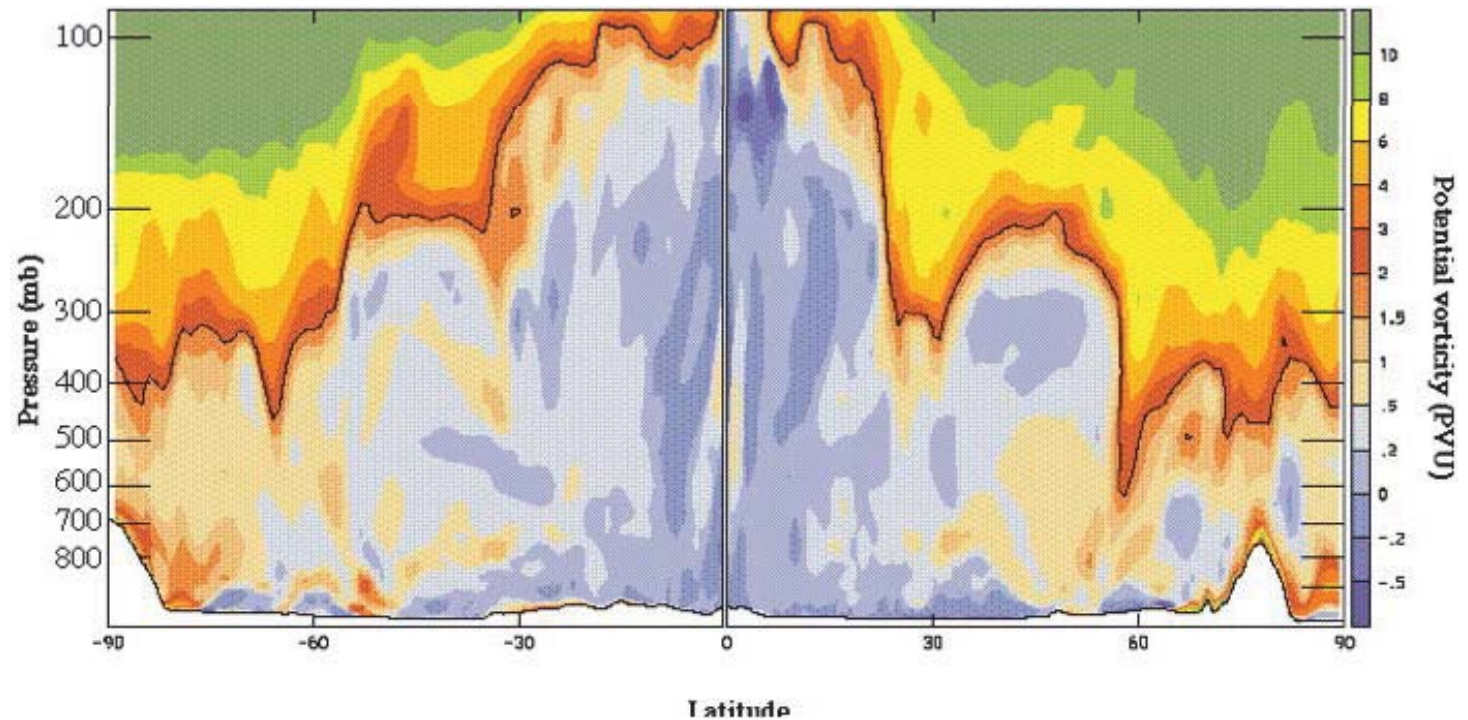




Tropopauza

- troposféra od stratosféry oddělena **tropopauzou**
- různé definice - termická, dynamická, chemická
- **termická** - (dle WMO) výška, kde teplota začne klesat méně než 0.2 °C na 100 m (zároveň tyto podmínky se průměrně nemění další 2 km výše)
- **dynamická** - definice dle tzv. potenciální vorticity, na sev. hemisféře více jak 1.5 PVU
- **chemická** - dle koncentrací ozonu a vodní páry

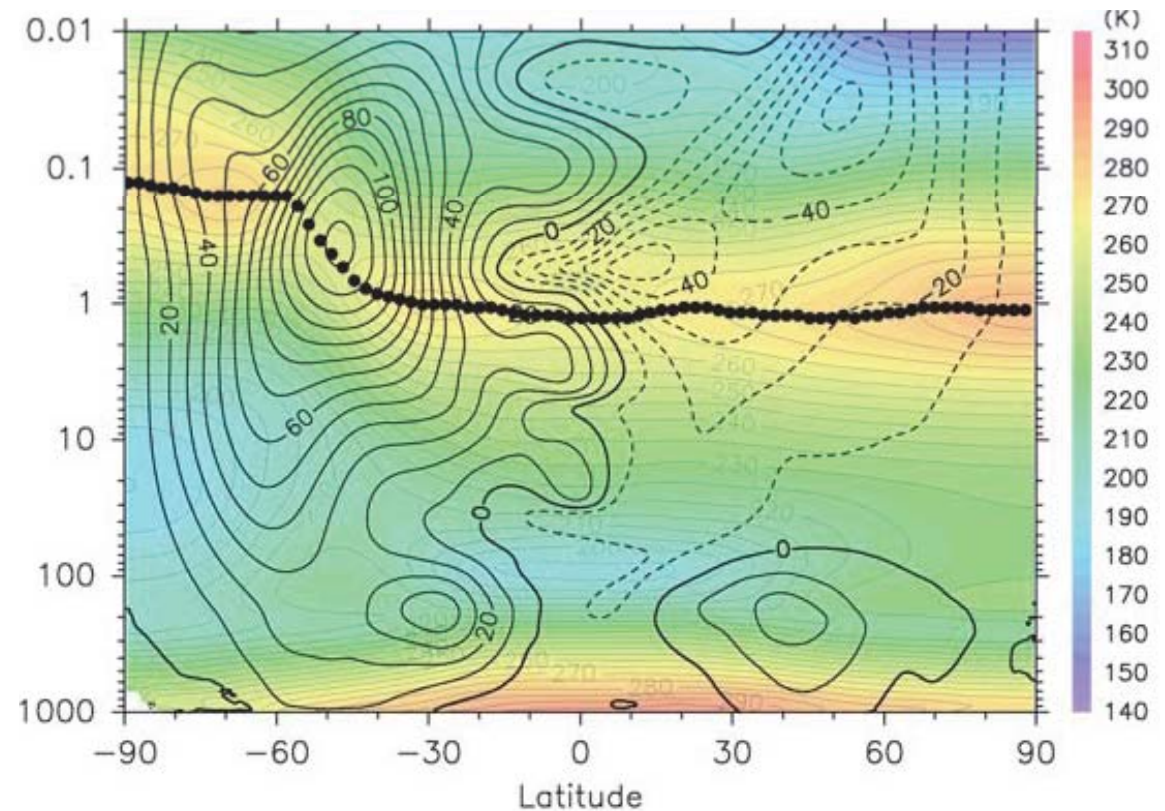
zdroj: http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/News17/ReportTropopWorkshopApril2001/17Haynes_Shepherd.html



Stratosféra a stratopauza

- **stratosféra** - teplota obecně roste z výškou
- stabilní zvrstvení, stabilní prostředí, téměř suchá (minimální vlhkost), téměř čistá (bez aerosolů), přítomnost ozonu - ovlivnění teplot
- končí **stratopauzou** ve výšce cca 1 hPa (45-50 km, 0-30°C)
- stratopauza výše na zimním pólem (až -18 °C), níže na letním pólem (až 12 °C)

zdroj: <http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kanto/>

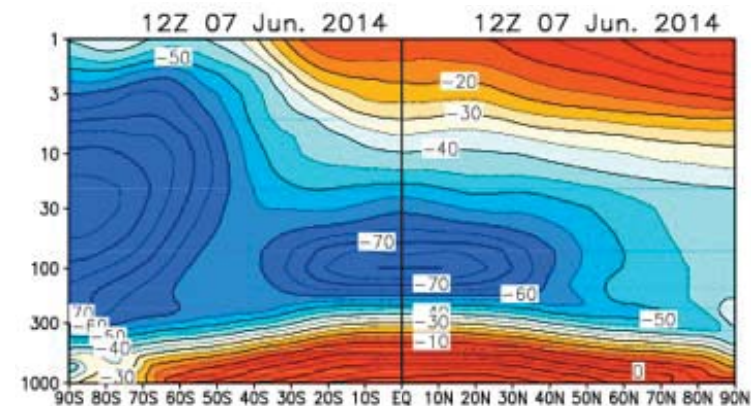
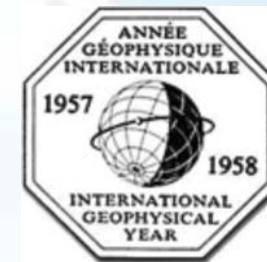


Latitude-pressure sections of monthly- and zonal-mean temperature (colors and thin contours) and zonal wind (thick contours) **in June**



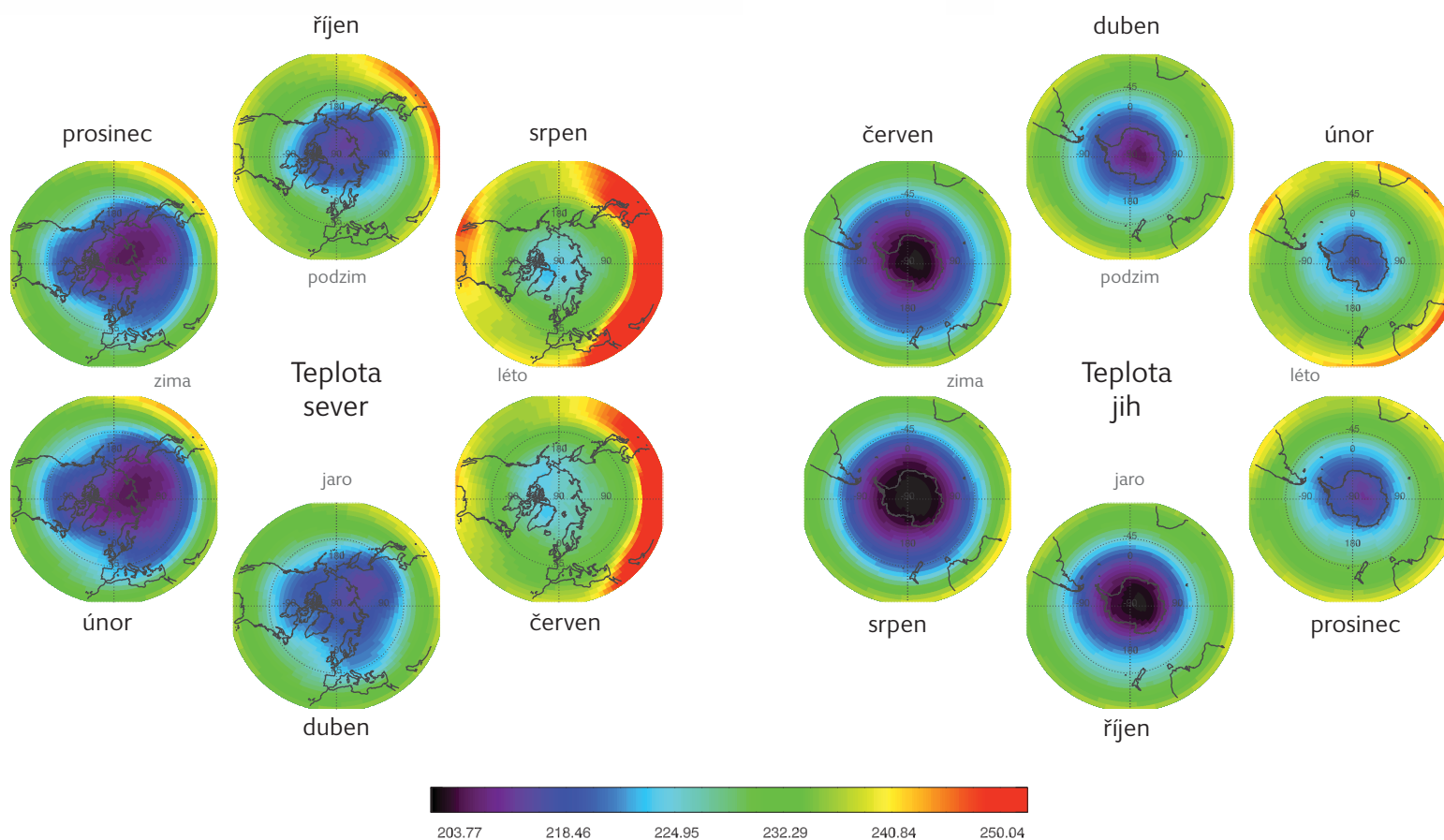
Stratosféra

- objevena díky balonovým letům na přelomu 19. a 20. století (<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/gkv/history/Hoinka-tropo97.pdf>)
- významný pokrok během IGY 1957-1958
- další velký pokrok s rozvojem meteorologických satelitů
- dnes různé druhy družic, radary, lidary...
- vývoj teoretického pozadí, vývoj numerického modelování
- dnes množství volně dostupných zdrojů dat
- ERA-40 atlas - http://old.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/docs/index.html
- NCEP/NCAR reanalýzy - <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.pressure.html>
- NOAA - <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/>
- FUB - <http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/winterdiagnostics/index.html>
- ...



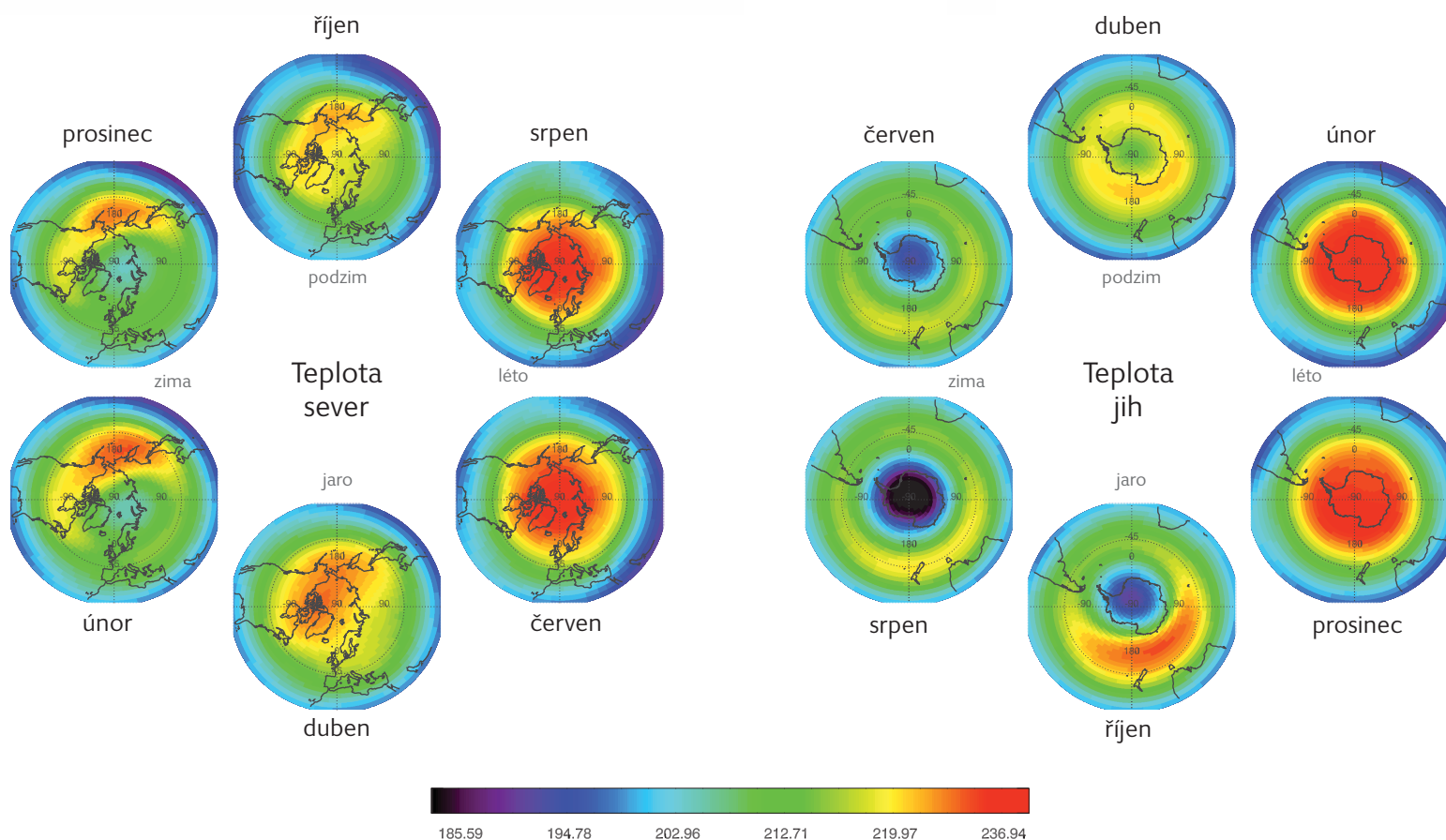
Stratosféra - teploty ve 300 hPa (~9 km)

- **horní hranice troposféry** - odráží radiční a tepelné poměry u povrchu
- **minima** v polárních oblastech během zimy
- **maxima** v subtropích během léta



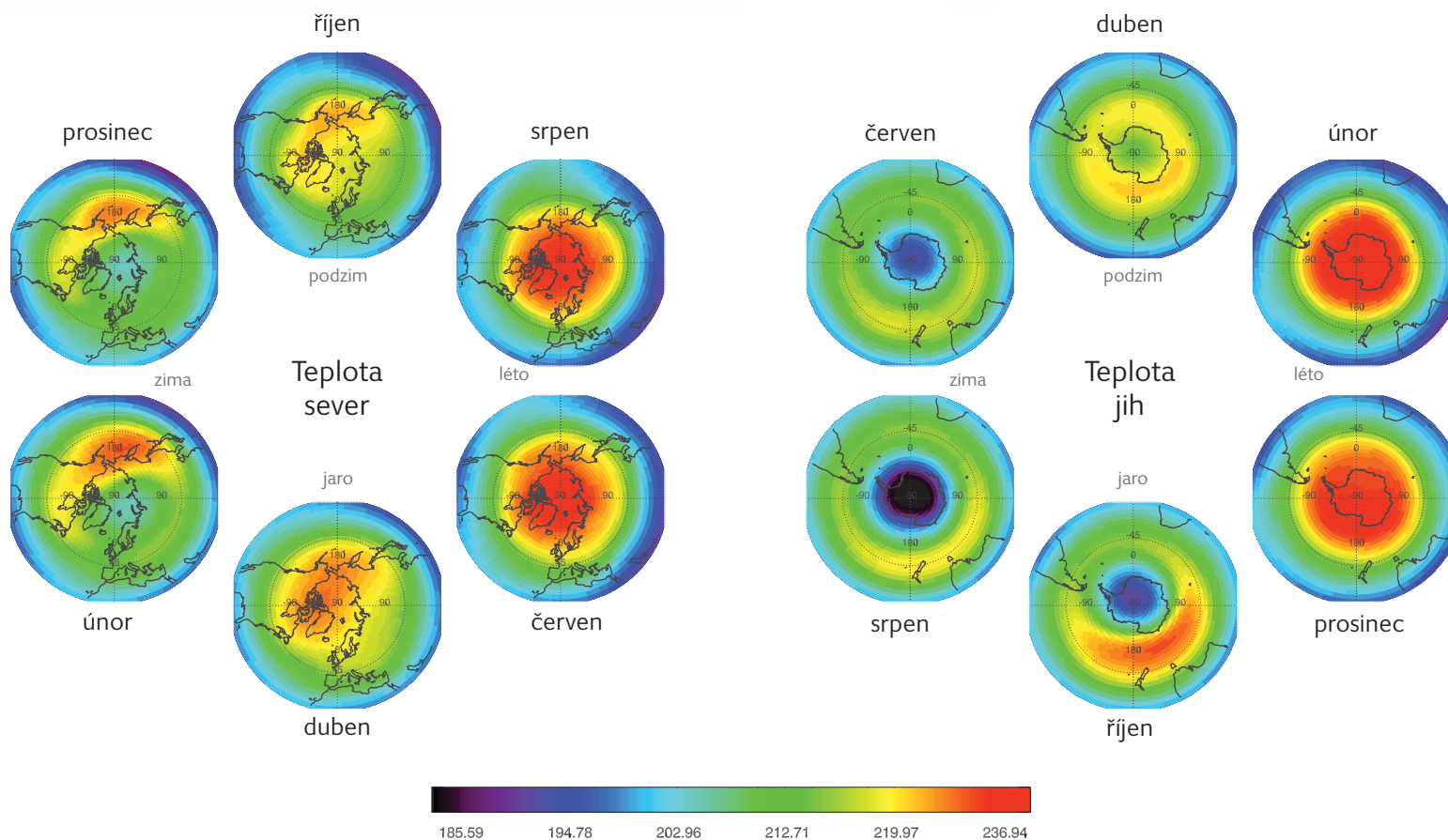
Stratosféra - teploty ve 100 hPa (~16 km)

- **spodní stratosféra** - podmínky podobné jako u tropopauzy
- **na kraji map (25°N/S) nízké teploty** díky kombinaci rozpínání vzduchu při výstupu a radiačnímu vyzařování mohutné konvektivní oblačnosti
- **maxima** teplot na pólech - kombinace sestupných pohybů a relativního srovnání s dalšími oblastmi



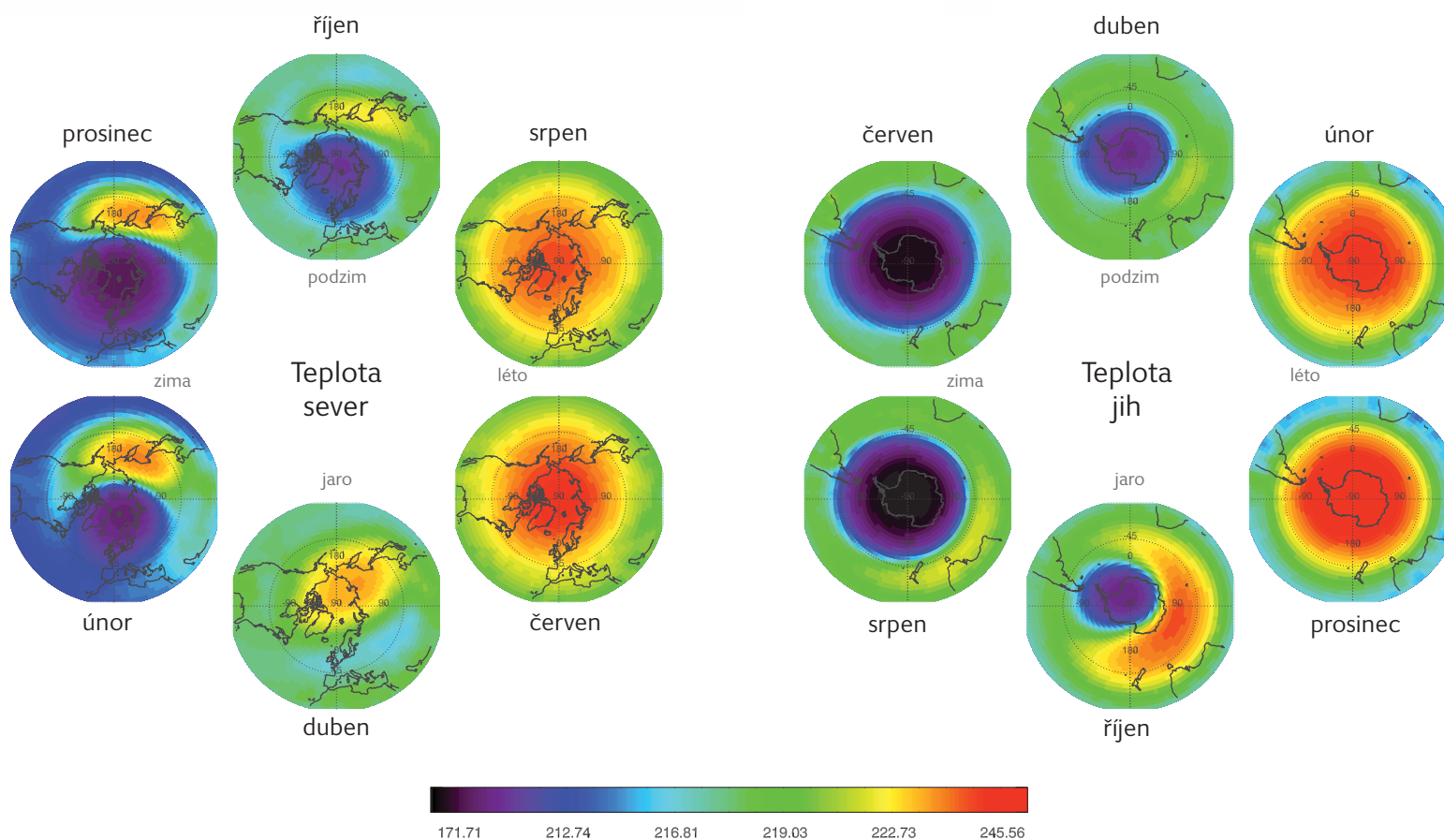
Stratosféra - teploty ve 100 hPa (~16 km)

- **spodní stratosféra** - podmínky podobné jako u tropopauzy
- **během polární noci** převáží radiační ochlazování - další **minima** teplot
- **významná anomálie v oblasti Aleutské výše**, na jihu podobně, ale výrazně menší
- významné rozdíly mezi S a J během zimy a jara



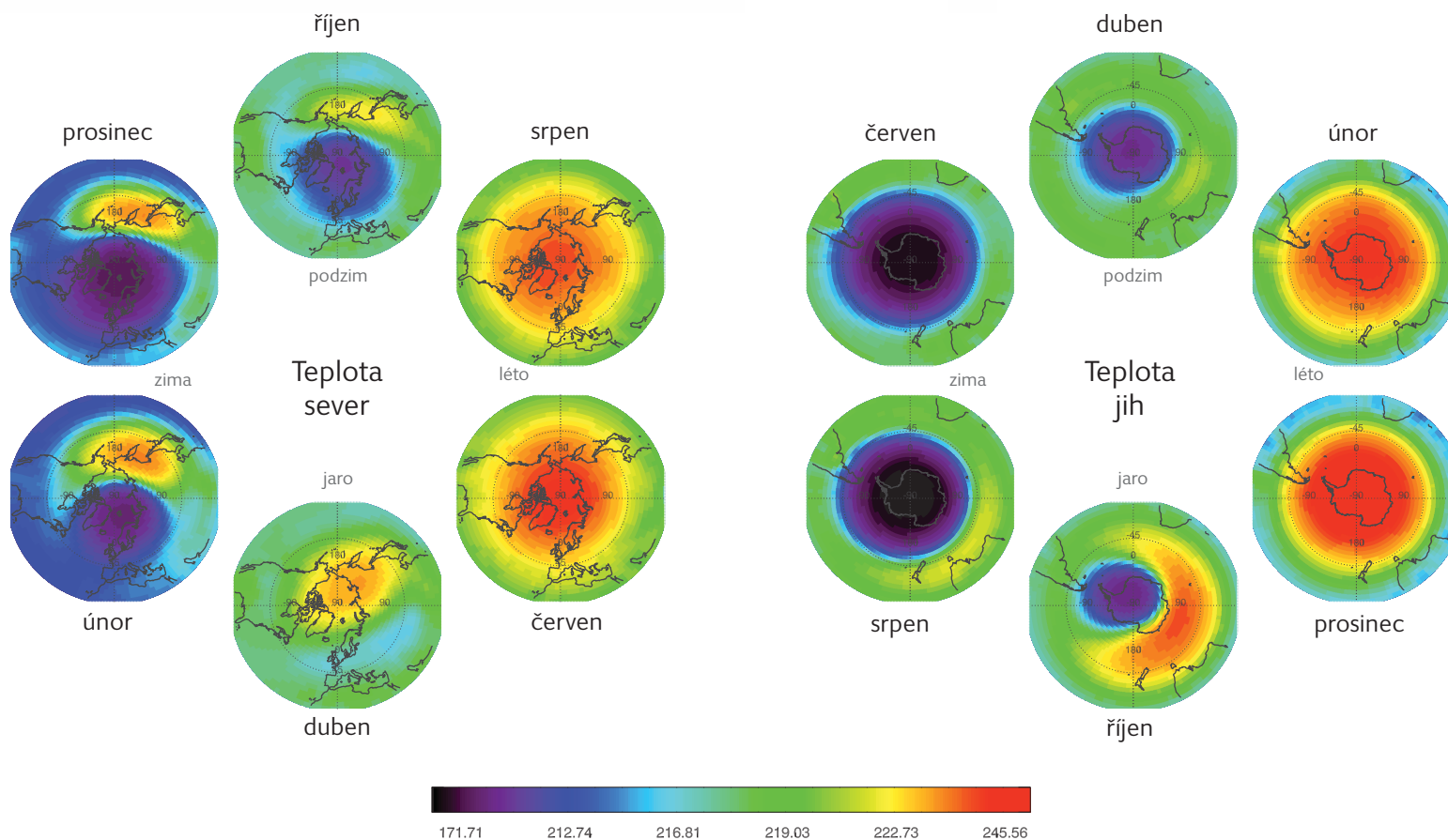
Stratosféra - teploty ve 30 hPa (~24 km)

- **nižší stratosféra** - oblast významná pro chemické procesy spojené s ozonem
- během roku **proměnlivý horizontální gradient**
- **maxima** teplot v oblasti pólů v létě, v létě menší teplotní kontrast
- **minima** teplot v oblasti pólů v zimě, formování tzv. polárního víru



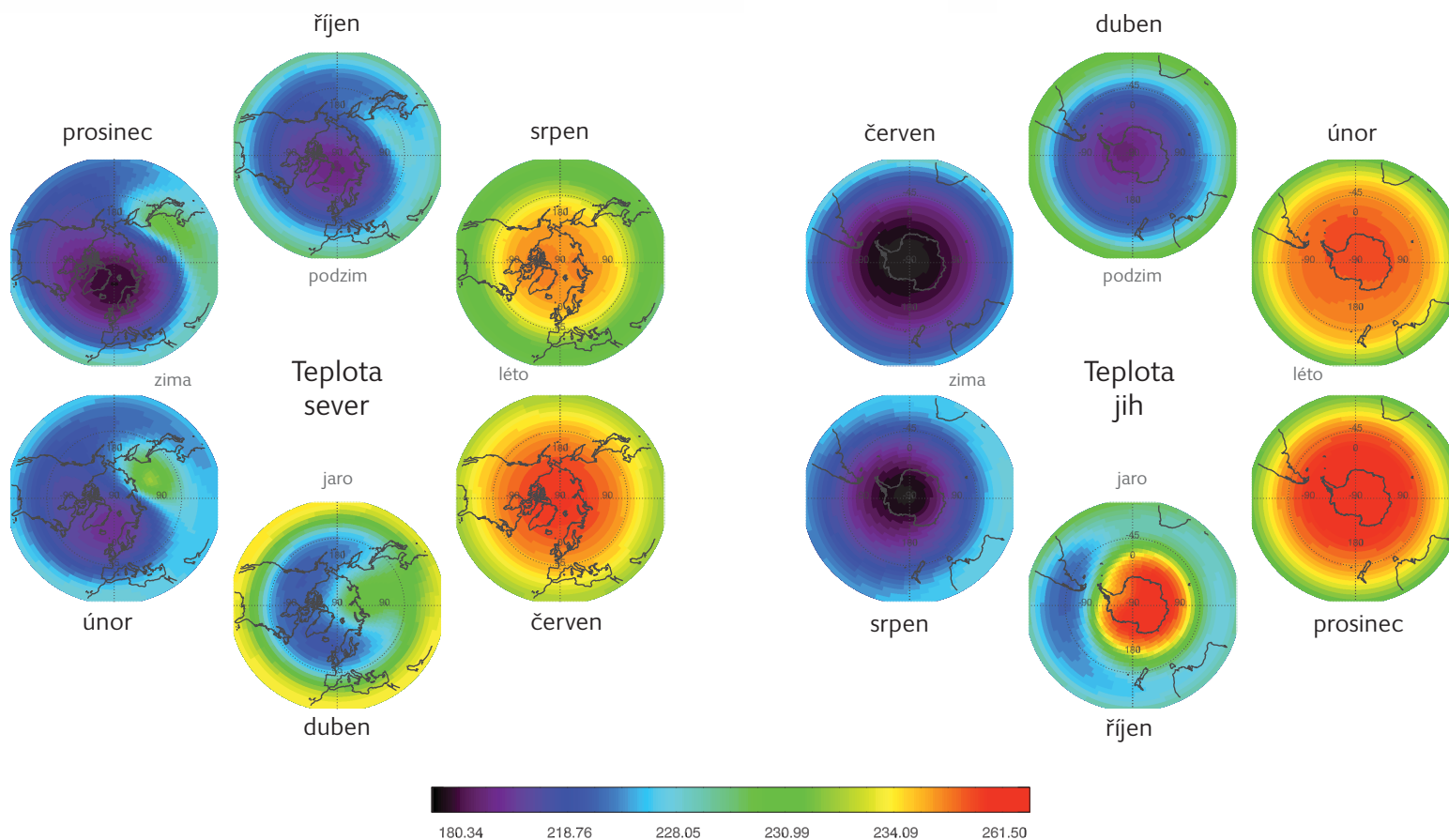
Stratosféra - teploty ve 30 hPa (~24 km)

- **oproti 100 hPa** v tropech vyšší teploty, na pólu v zimě nižší teploty a v létě vyšší
- na severu opět 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



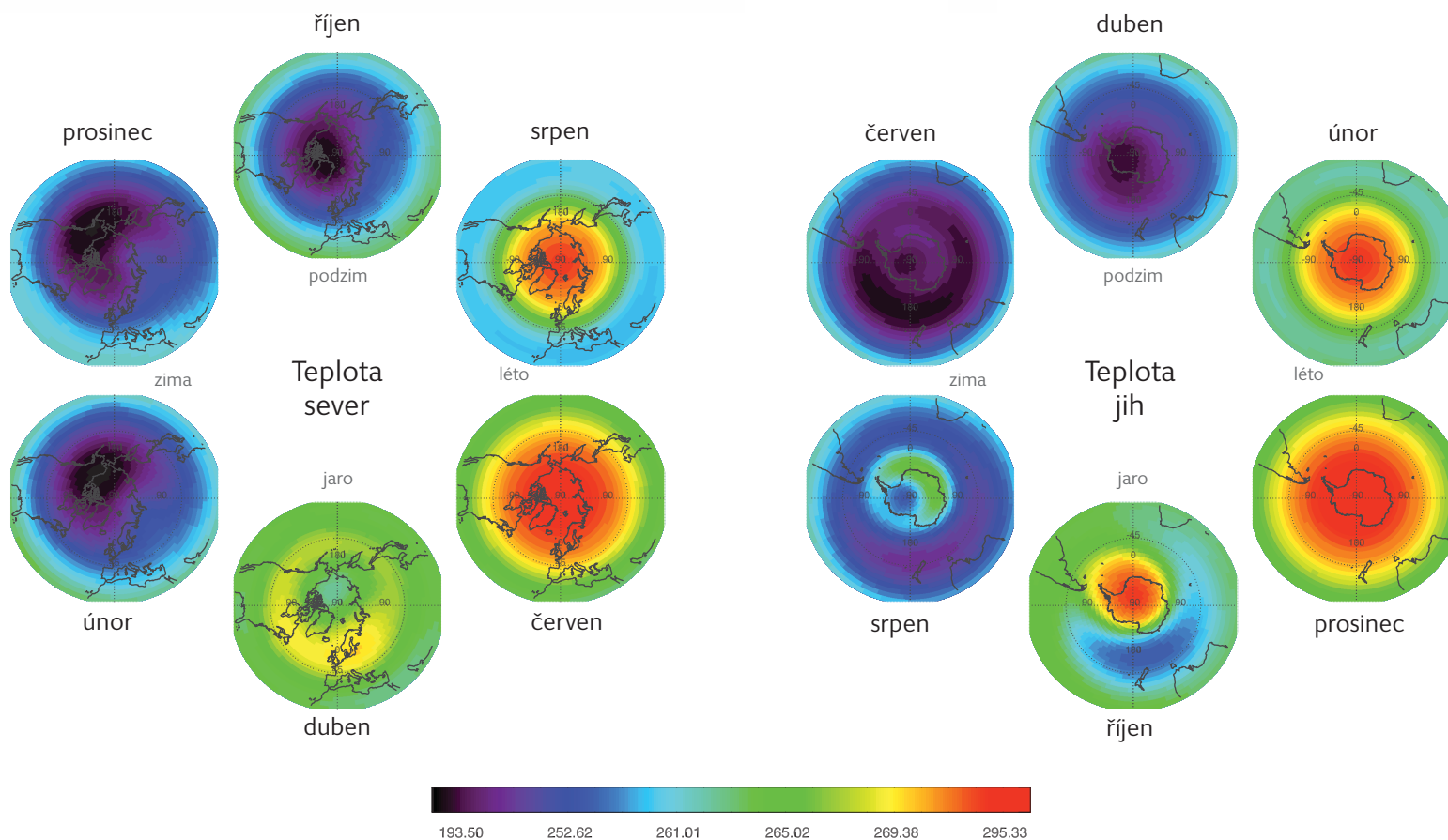
Stratosféra - teploty ve 10 hPa (~31 km)

- **střední stratosféra**
- na jihu výraznější teploty oproti severu - v zimě na pólu nižší teploty a v létě vyšší
- **výrazná změna na jaře** - vliv velkoprostorové cirkulace, koncentrací ozonu i atmosférických vln



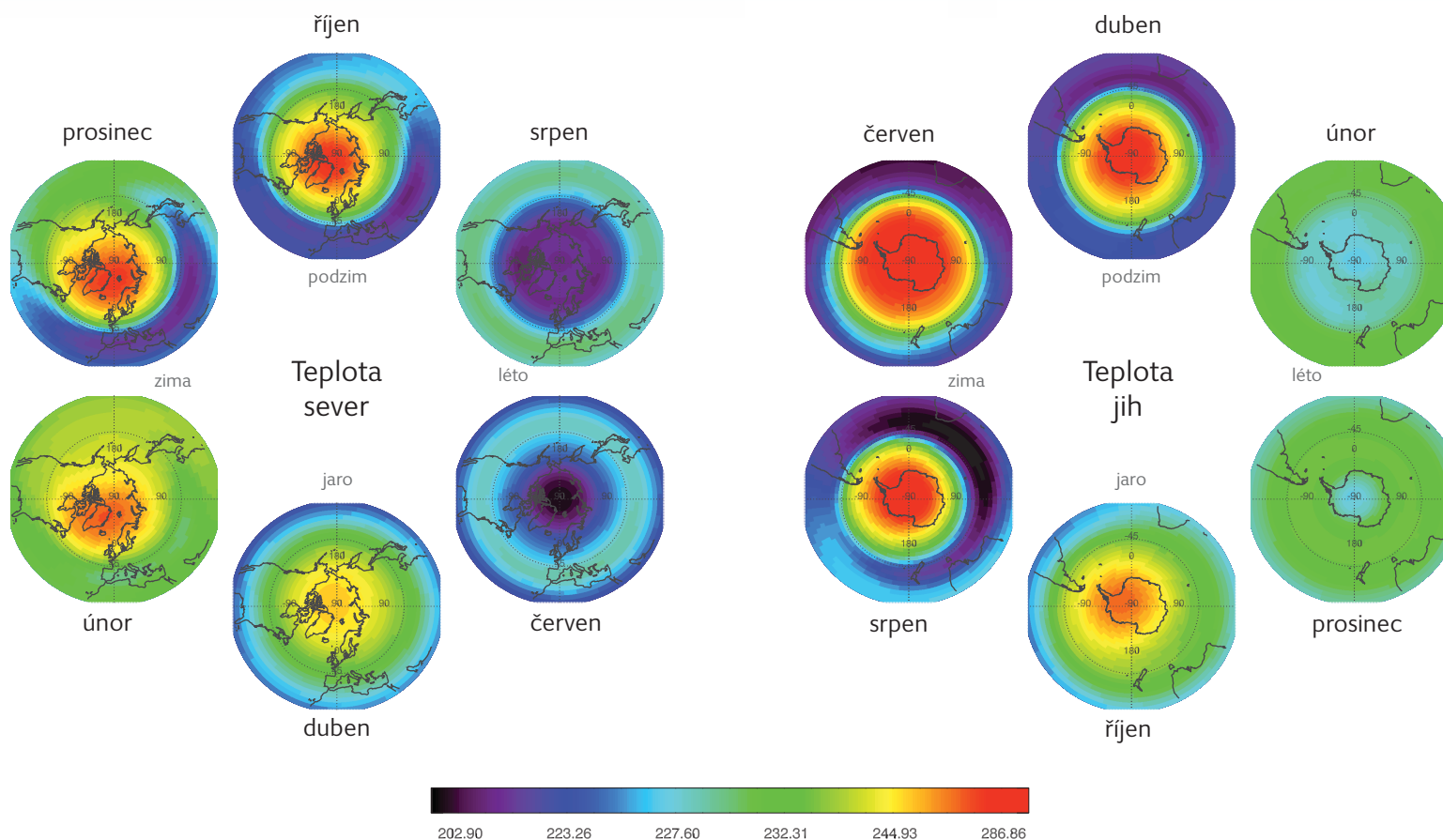
Stratosféra - teploty ve 1 hPa (~48 km)

- **vysoká stratosféra**, oblast stratopauzy i mezosféry
- **proměna podmínek pozdní zimy a jara** - vyšší teploty na jihu
- pravděpodobný vliv velkoprostorové cirkulace i atmosférických vln



Stratosféra - teploty v 0.1 hPa (~65.5 km)

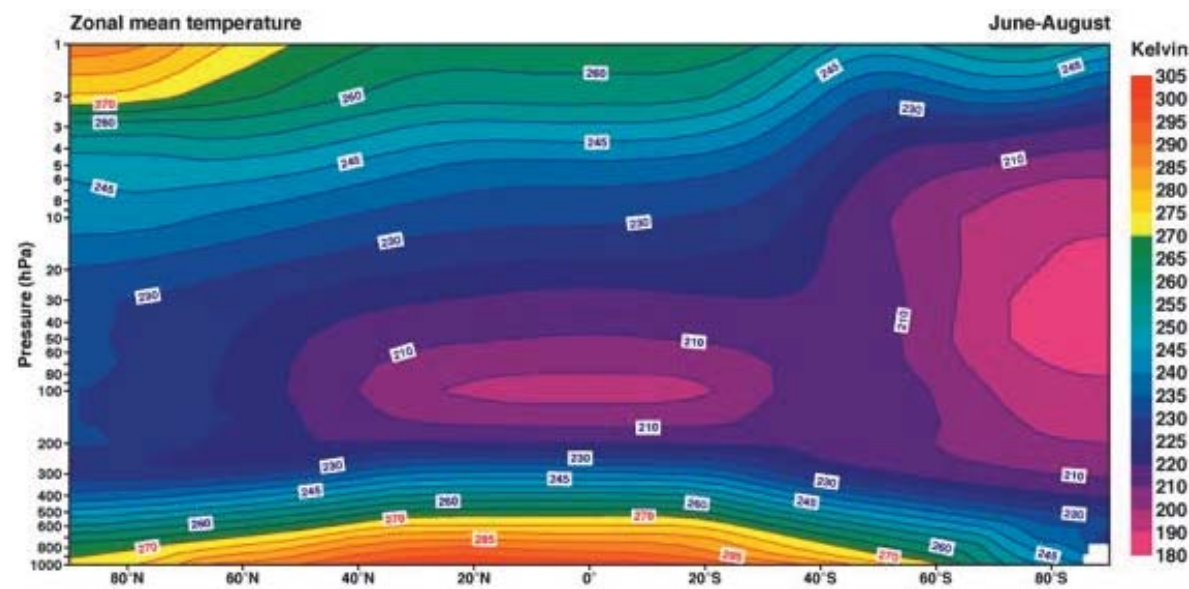
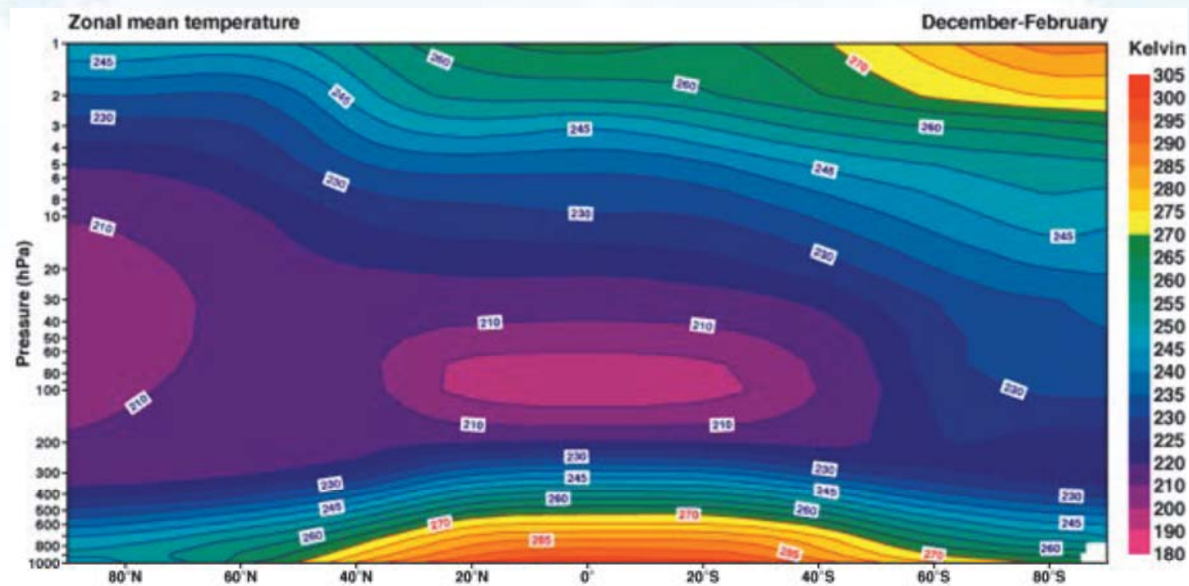
- **mezosféra**
- naprostá proměna podmínek, **minima** během letního období, **maxima** v zimě
- souvislost s působením atmosférických vln a velkoprostorovou cirkulací



Stratosféra - teploty vertikálně

- **vertikální profily** zima na severní a jižní polokouli
- **minima** v oblasti tropické tropopauzy a polárních vírů
- **maxima** v oblasti letní stratopauzy
- významný rozdíl v polárních oblastech během zimy na severu a na jihu

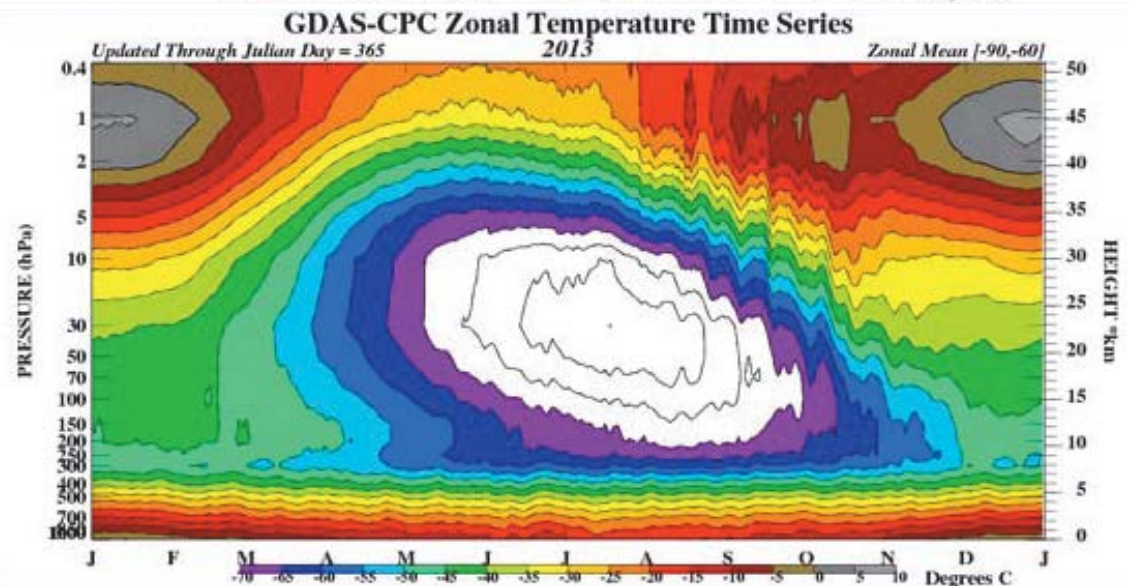
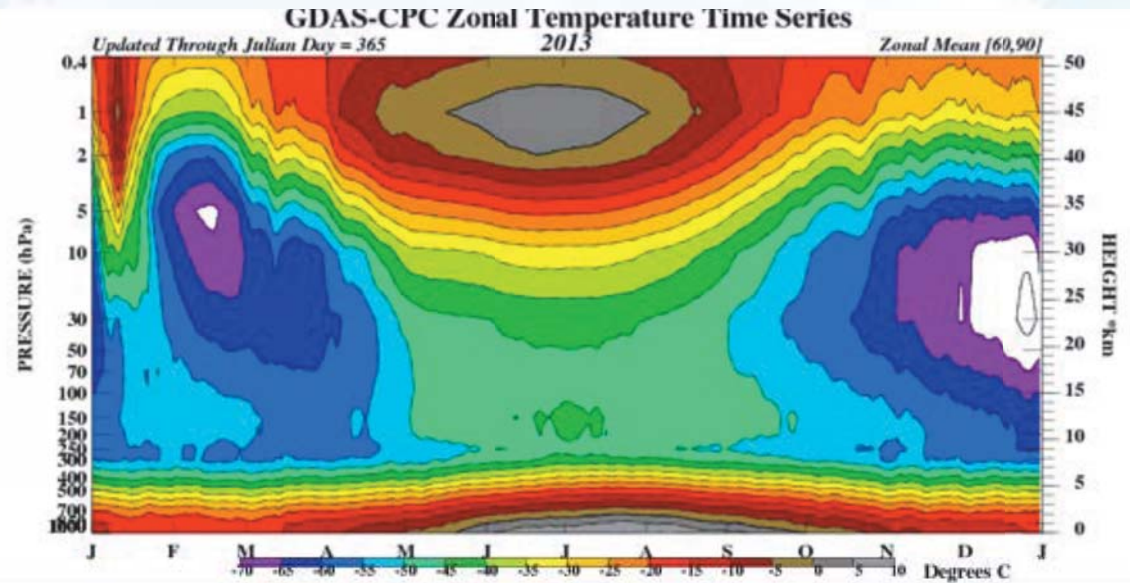
zdroj: http://old.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/docs/section_D25/parameter_zmtsp.html#



Stratosféra - teploty vertikálně

- **časový vývoj** vertikálního profilu teploty pro **severní a jižní polární oblasti**
- **minima** v zimě kolem 20 km
- **maxima** v létě v oblasti stratopauzy kolem 45 km
- rozdíly v zimě, na severu výraznější proměnlivost a anomálie

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



Polární vír

- rovněž také **cirkumpolární vír, polar vortex, circumpolar vortex**
- vznik s nástupem polární noci - zvýšení meridionálního teplotního gradientu, prohlubují se rozdíly mezi tropy a pólem
- ustanovení silné západní cirkulace
- další izolace polárních oblastí
- radiačně dynamické procesy

zdroj: Harvey et al., 2002

zdroj: Mohanakumar, 2008

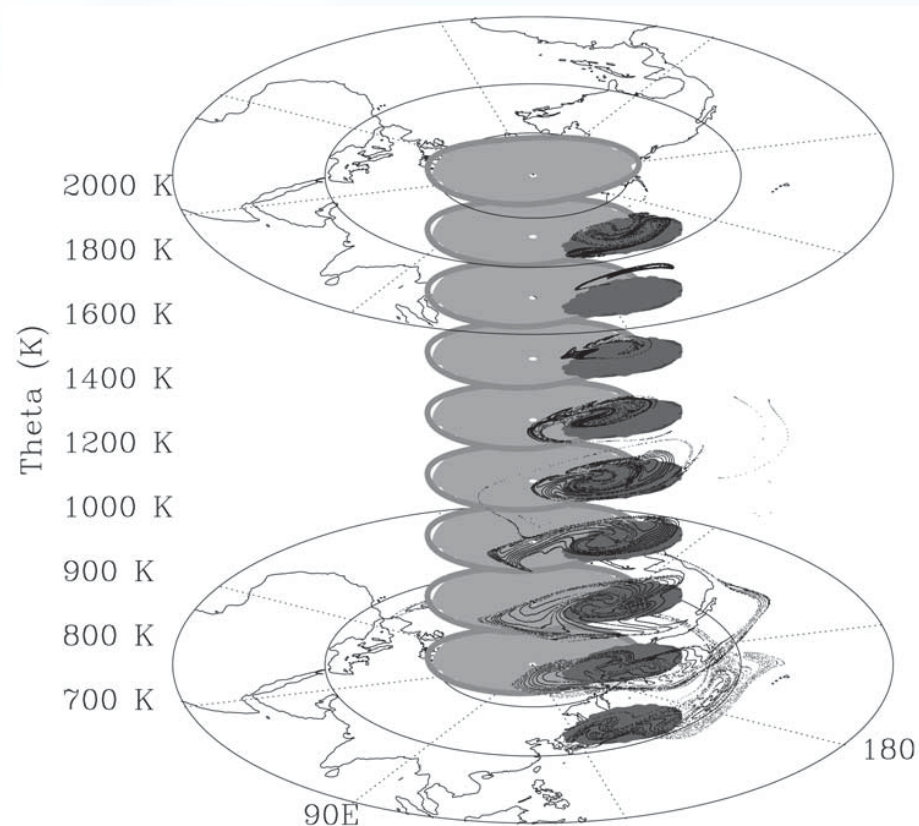
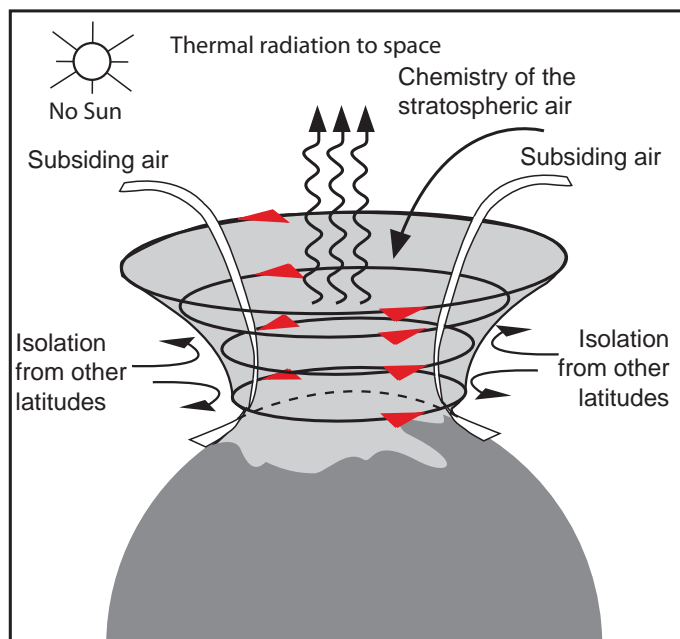


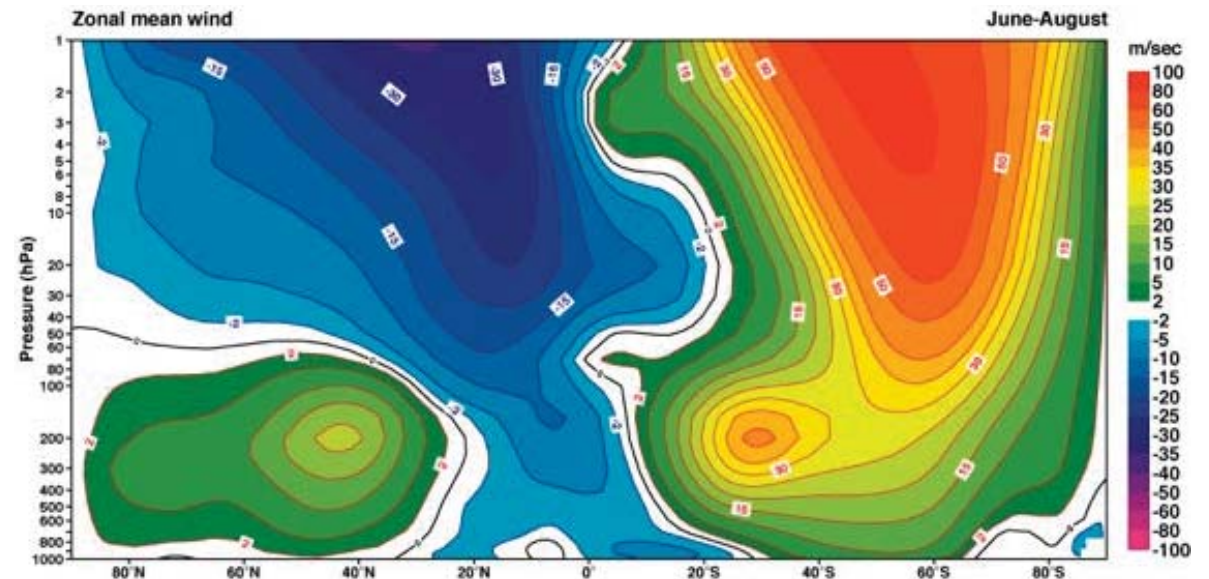
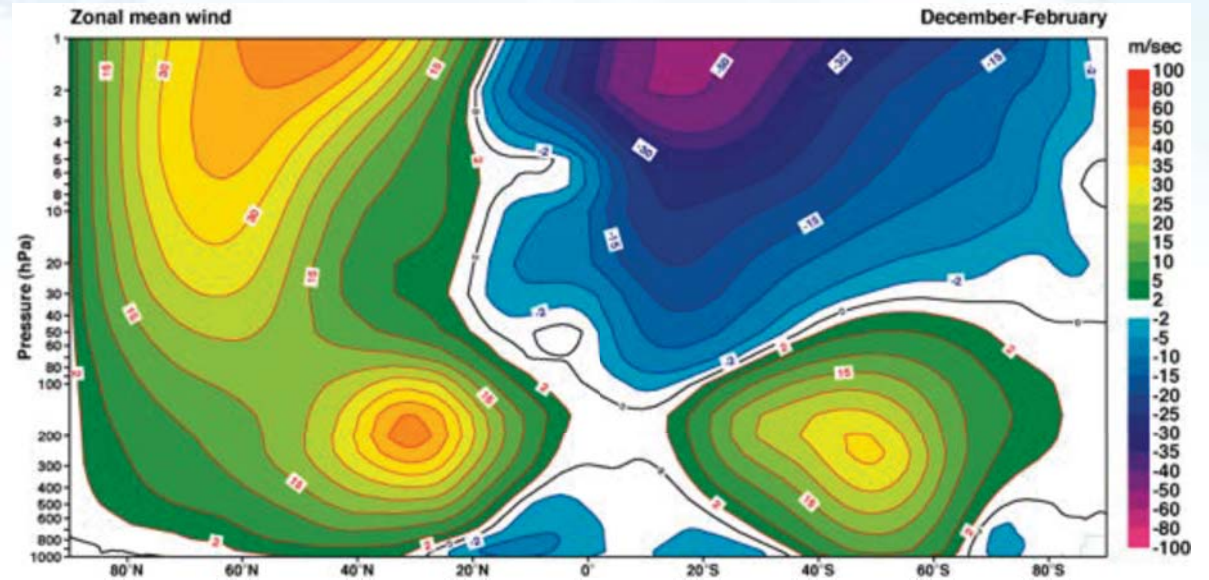
Figure 2. Arctic vortex and Aleutian High edges contoured on 9 overlapping polar stereographic projections on 12 January 2000. The vertical range is from 700 to 1600 K (20–1.5 hPa, or 26–42 km). The Arctic vortex is filled in grey. Material lines (dark contours) are initialized 5 days earlier inside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

Polární vír

- výrazná zimní polární cirkulace
- také tzv. polar night jet
- výrazné rozdíly mezi severním a jižním pólem
- jižní cirkulace silnější a stabilnější
- zásadní pro vytvoření ozonové díry



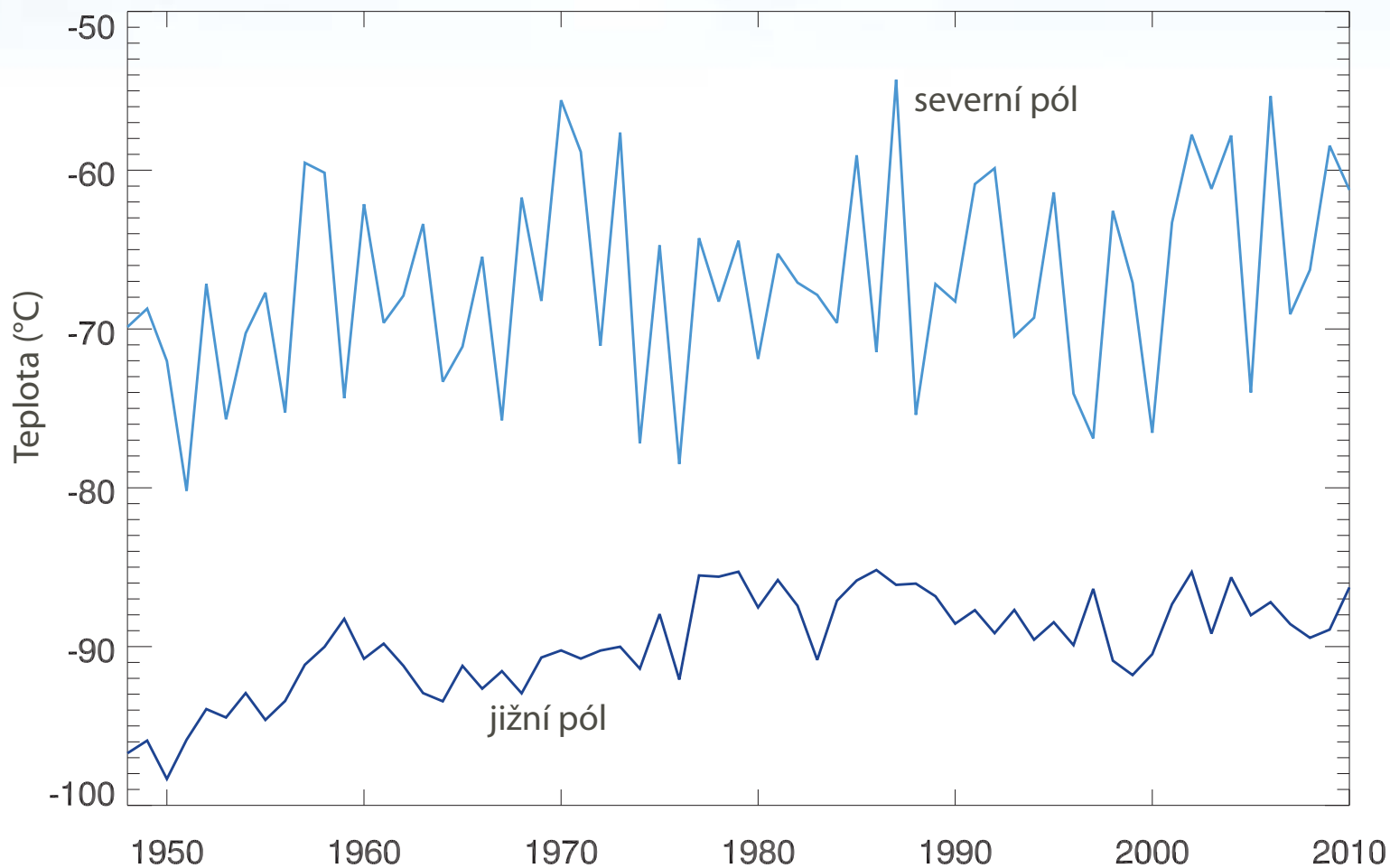
zdroj: http://old.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/docs/section_D25/parameter_zmtsp.html#





Zimní polární teploty na severu a na jihu

- teplota polárních oblastí ve 30 hPa, průměr leden-únor a červenec-srpen
- **rozdíly v absolutních hodnotách i míře variability**
- vliv náhlého stratosférického oteplení



Zimní polární teploty na severu a na jihu

- teplota polárních oblastí v 50 hPa
- průměr 1979-2008
- rozdíly v absolutních hodnotách i míře variability
- **výrazně nižší teploty na jihu**
- vznik PSC I a II
- vliv náhlých stratosférických oteplení
- **sudden stratospheric warming - SSW**

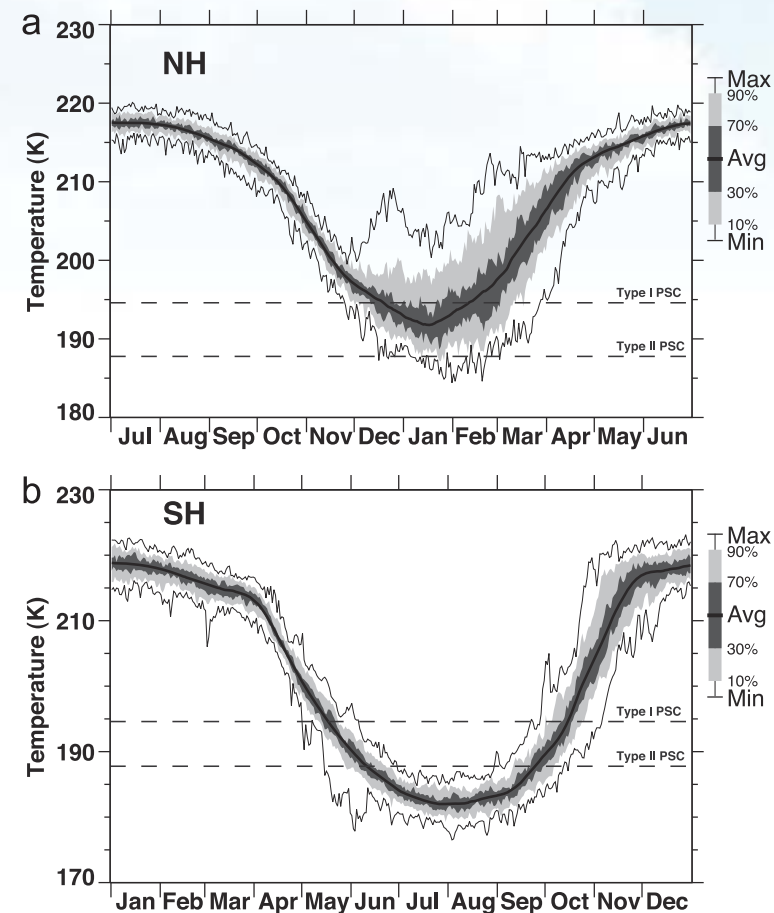
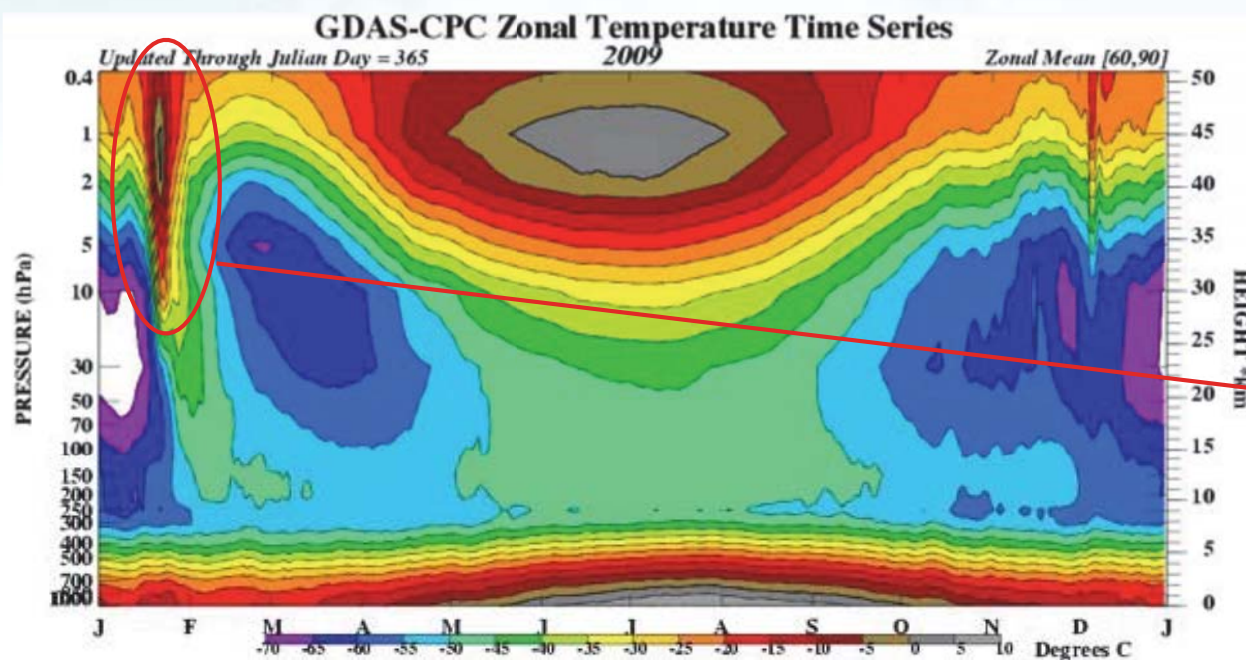


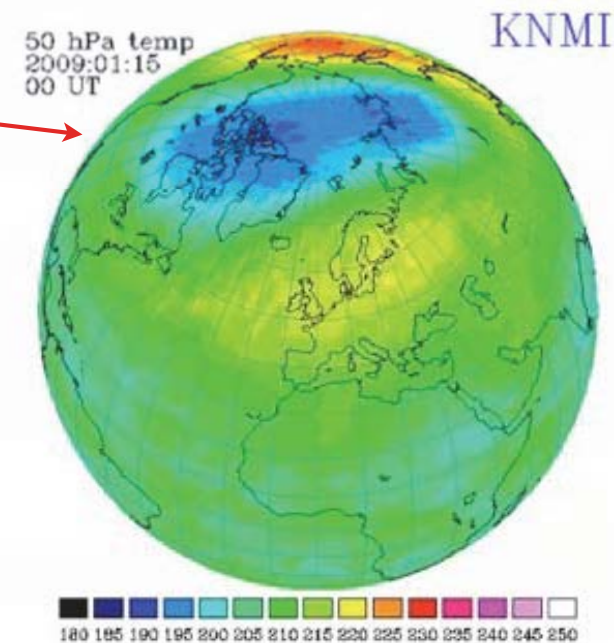
Figure 2. Time series of climatological daily minimum polar temperatures at 50 hPa for the (a) Arctic (50° – 90° N) and (b) Antarctic (50° – 90° S). The daily climatology is determined from the 1979–2008 period. The black line shows the average for each day of this 1979–2008 climatology. The grey shading shows the percentage range of those same values. Image courtesy of P. Newman.

Náhlé stratosférické oteplení - SSW

- sudden stratospheric warming
- zhroucení zimního polárního víru, proměna teplotního gradientu



zdroj: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere>

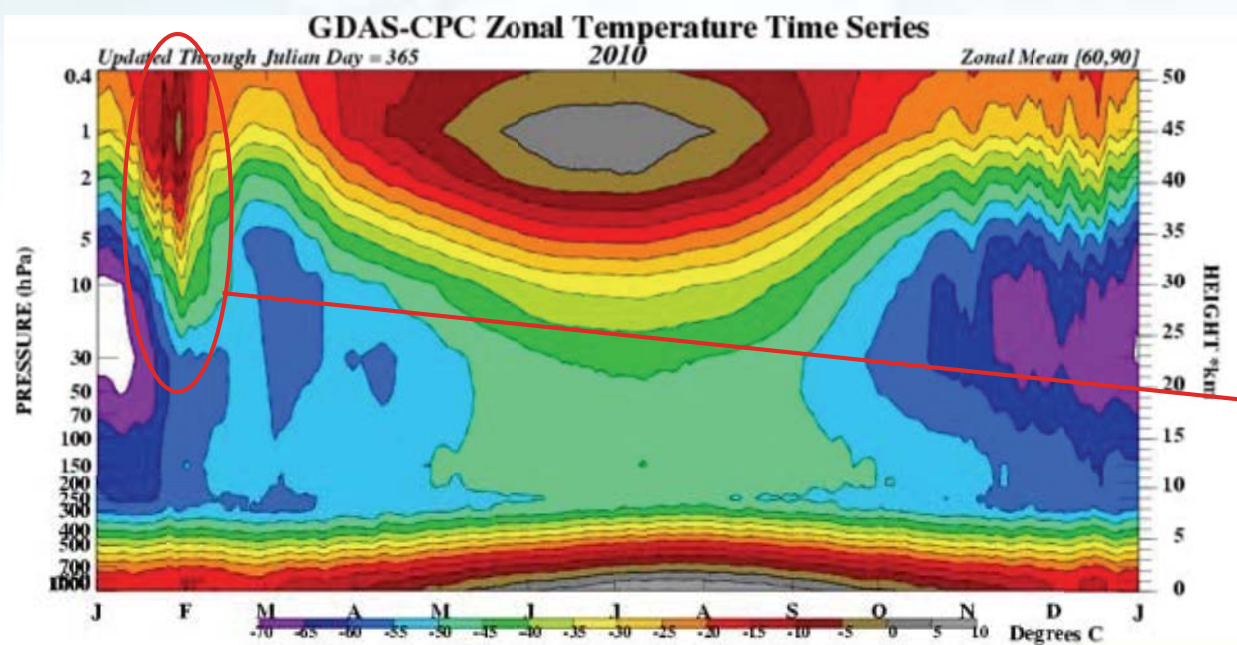


- 2008/2009
- vertikální profil teploty a pole ve 50 hPa



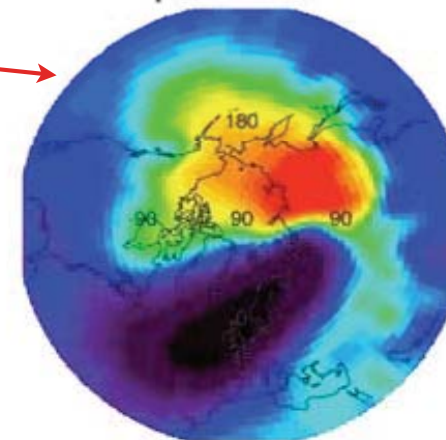
Náhlé stratosférické oteplení - SSW

- první popis 1958, klasifikace zahrnuje několik typů, téměř výlučně na severu
- **zhroucení zimního polárního víru**, proměna teplotního gradientu



zdroj: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere>

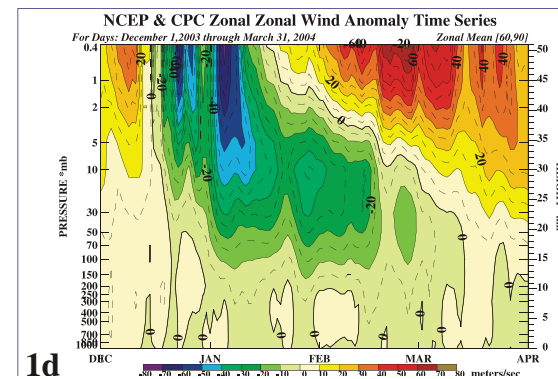
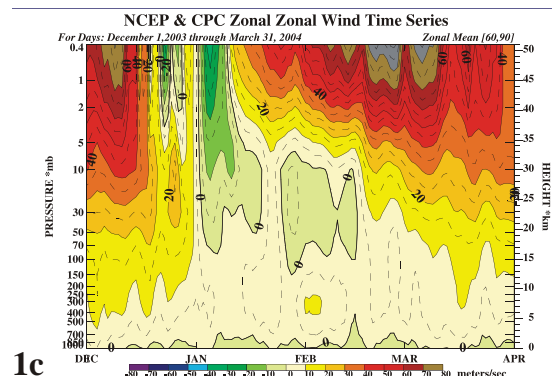
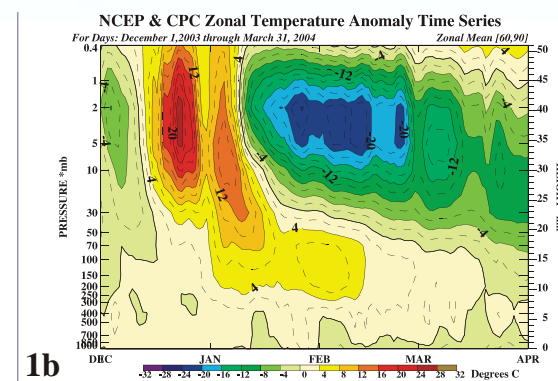
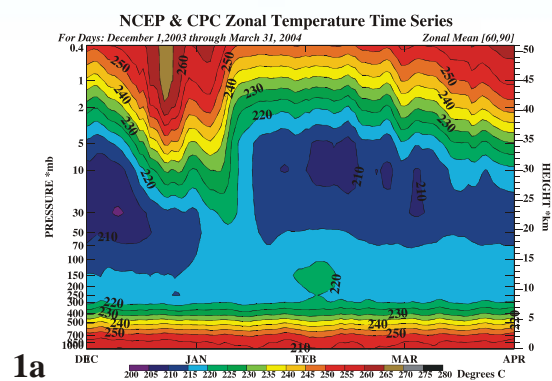
Temperature 26. 1. 2010



- 2009/2010
- vertikální profil teploty a pole ve 30 hPa

Náhlé stratosférické oteplení - SSW

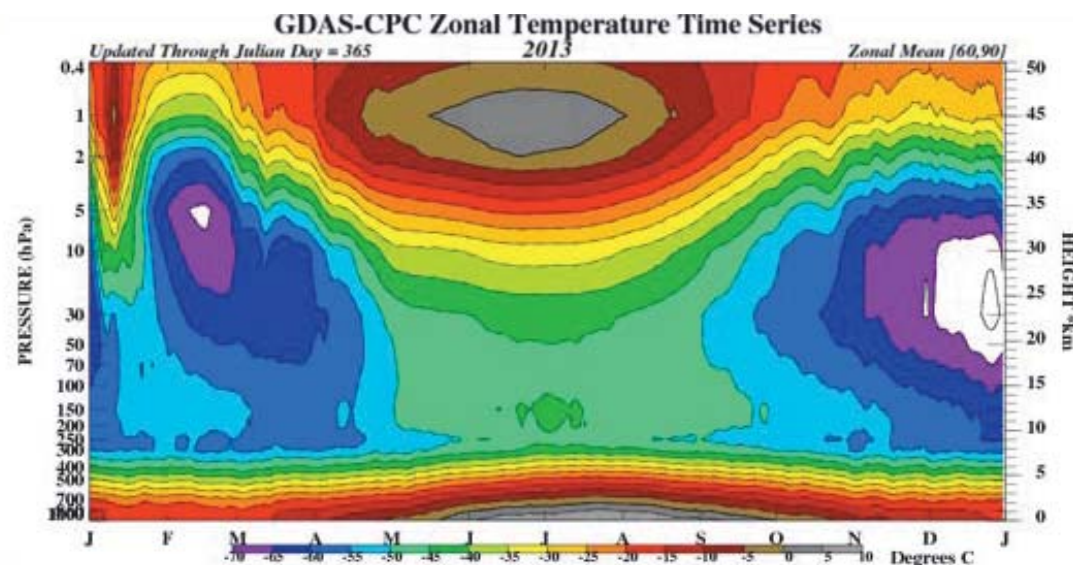
- výrazné změny v **polární stratosféře i mezosféře**
- počátek oteplení spojen s **výstupem stratopauzy** nad 60 km
- **během vrcholu oteplení stratopauza klesá** o cca 20 km, během několika dní, **teplota vzroste až o 40 °C**, mezosféra i dolní stratosféra se dále ochlazují
- po dosažení vrcholu oteplení pokračuje pokles stratopauzy, nižší mezosféra se ochlazuje, střední stratosféra (20-30 km) se otepluje
- v době **zhroucení polárního víru** zasahuje oteplení i dolní stratosféru, naprostá změna cirkulace, stratopauza se silně prochlazuje, **20-80 km téměř izotermní**





Náhlé stratosférické oteplení - klasifikace

- dle WMO základní rozdělení na 3+1 typy
- **hlavní** (major): pokud dojde k obrácení horizontálního teplotního gradientu a k převrácení cirkulace z východní na západní v hladině 10 hPa a níže
- **vedlejší** (minor): dojde k výraznému oteplení, nedochází ale k převrácení cirkulace a rozpadu polárního víru
- **finální** (final): souvisí s přechodem k letní cirkulaci, proudění se mění ze západního na východní, zpátky se mění až s příchodem další zimy
- kanadské (canadian): objevuje se v počátku zimy, pouze na severní hemisféře, podobně jako vedlejší



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_o/• vs. W_{□/■})**
- vyplněné symboly označují zimy s náhlým str. oteplením

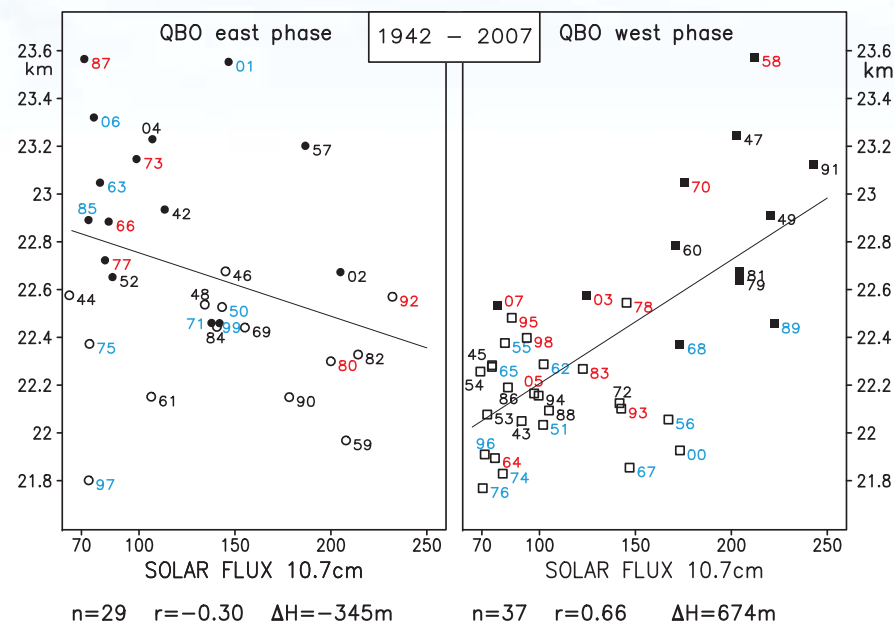
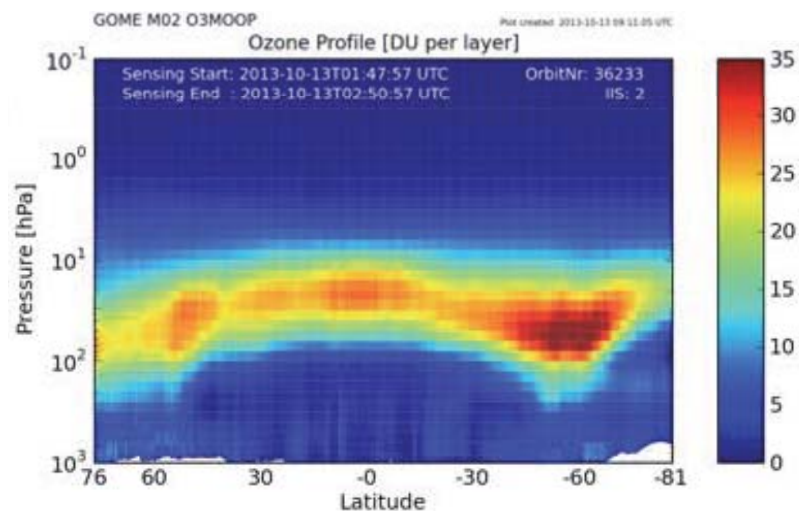


Fig. 4. Scatter diagrams of the monthly mean 30-hPa geopotential heights (geopot.km) in February at the North Pole (1942 till 2007), plotted against the 10.7 cm solar flux. Left: Circles: years in the east phase of the QBO ($n = 29$). Right: Squares: years in the west phase ($n = 37$). The numbers indicate 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.)

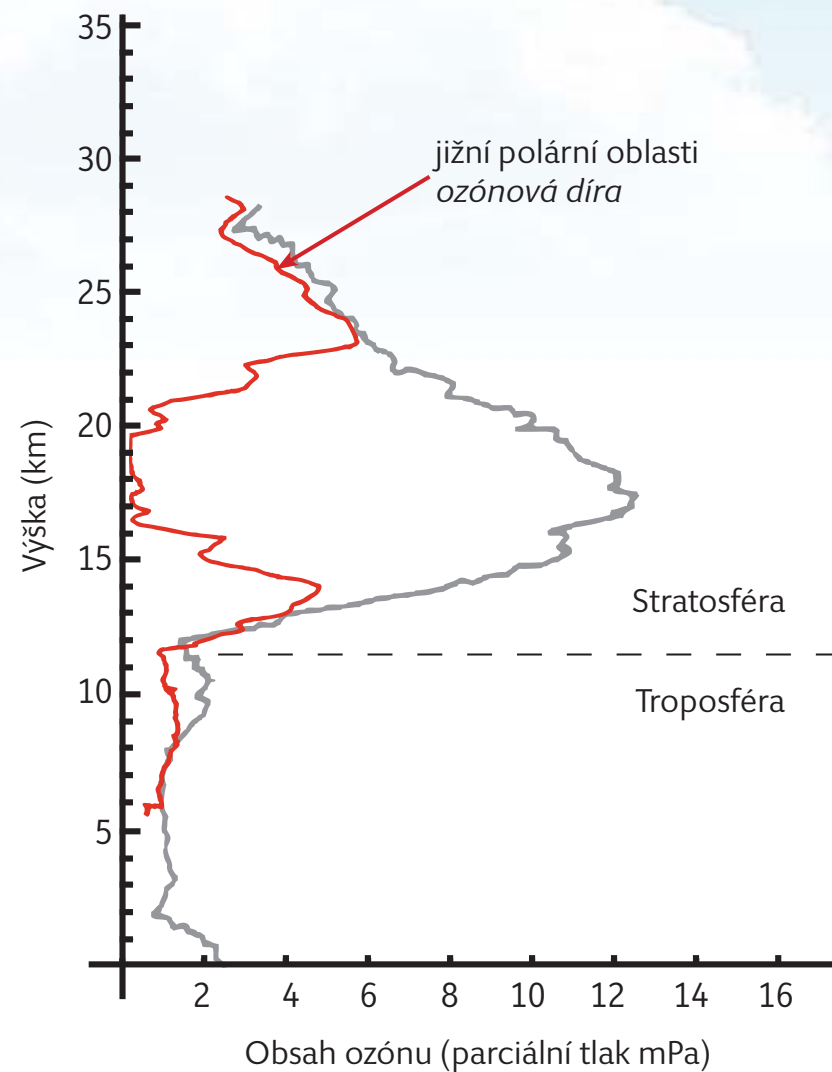
zdroj: Labitzke and Kunze, 2009

Polární stratosféra a ozon

- maximum koncentrací v oblasti stratosféry - ozónová vrstva
- **jarní podmínky jižní polární stratosféry** - vznik ozónové díry
- destrukce ozónu v oblasti maxima koncentrací



zdroj: <http://www.temis.nl/profiles/>



Polární stratosféra a ozon

- pro vznik ozonové díry jsou zásadní podmínky jižního polárního víru
- **stabilita a nízké teploty** (< 190 K)
- to vede k tvorbě PSC - **na povrchu oblačných kapiček/krystalků** pak probíhají **heterogenní chemické reakce** → transformace nereaktivních halogenových sloučenin do více labilních forem



zdroj: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

zdroj: Waugh and Polvani, 2010

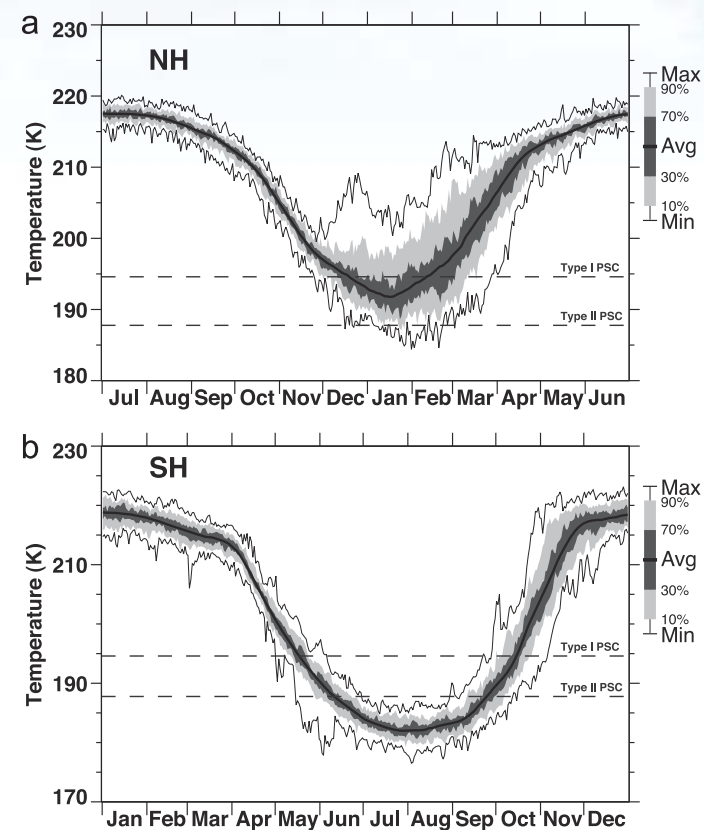


Figure 2. Time series of climatological daily minimum polar temperatures at 50 hPa for the (a) Arctic (50° – 90° N) and (b) Antarctic (50° – 90° S). The daily climatology is determined from the 1979–2008 period. The black line shows the average for each day of this 1979–2008 climatology. The grey shading shows the percentage range of those same values. Image courtesy of P. Newman.

Polární stratosféra a ozon

- pro vznik ozonové díry jsou zásadní podmínky jižního polárního víru
- **stabilita a nízké teploty** (< 190 K)
- to vede k tvorbě PSC - **na povrchu oblačných kapiček/krystalků** pak probíhají **heterogenní chemické reakce** → transformace nereaktivních halogenových sloučenin do více labilních forem
- např. ClONO_2 a HCl v plynné fázi málo reaktivní, ale vysoce reaktivní při rozpuštění na povrchu oblačné kapičky
- **při návratu slunce** do oblasti stále nízké teploty a labilní sloučeniny Cl
- **rozvoj fotochemických reakcí** vedoucích k uvolnění atomů chloru (resp. Cl_x) a destrukci O_3 (resp. O_x)

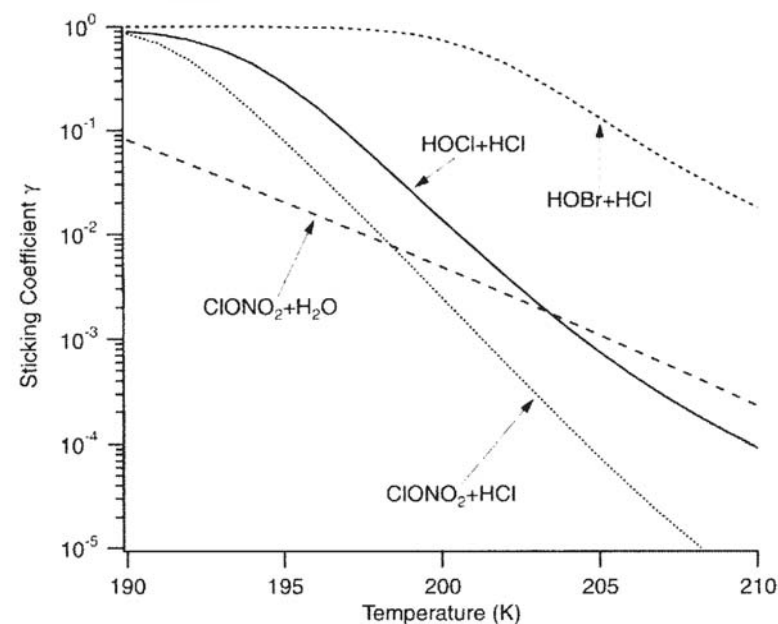


Figure 6.3 Reactive uptake coefficients γ for various reactions of stratospheric importance as a function of temperature. γ is for first-order loss of ClONO_2 , HOCl , and HOBr . Conditions are typical of the lower stratosphere: 60 hPa, 5 ppmv H_2O , and aerosol radius $0.2 \mu\text{m}$. $[\text{HCl}]$ is 1.5 ppbv, except for the $\text{ClONO}_2+\text{H}_2\text{O}$ reaction, where $[\text{HCl}]$ is zero. The $\text{ClONO}_2+\text{HCl}$ and $\text{ClONO}_2+\text{H}_2\text{O}$ formulations are from Hanson and Ravishankara [30] and Hanson [201], the $\text{HCl}+\text{HOCl}$ formulation is from Donaldson *et al.* [202], and the $\text{HCl}+\text{HOBr}$ formulation is from D. R. Hanson (personal communication, 1998).

Polární vír a ovlivnění počasí

- zejména skrze **ovlivnění AO** (Arctic Oscillation, také NAM - northern annular mode)
- atmosférická **fluktuace v tlaku** v polárních regionech a středními šířkami (45°N)
- 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
- negativní fáze - vyšší tlak v polárních oblastech a nižší ve středních šířkách
- **ovlivnění dráhy polárního jet streamu**

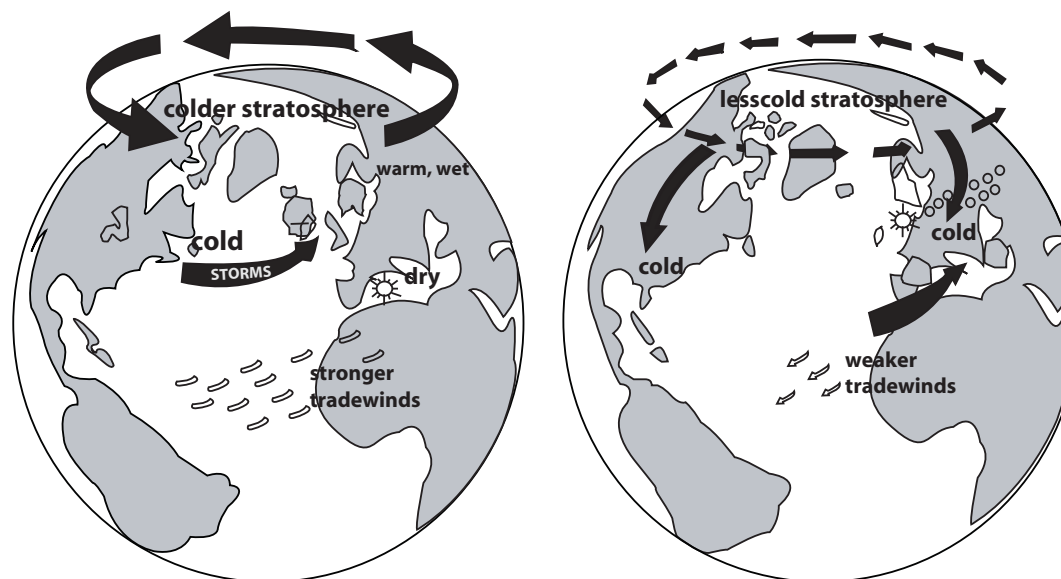
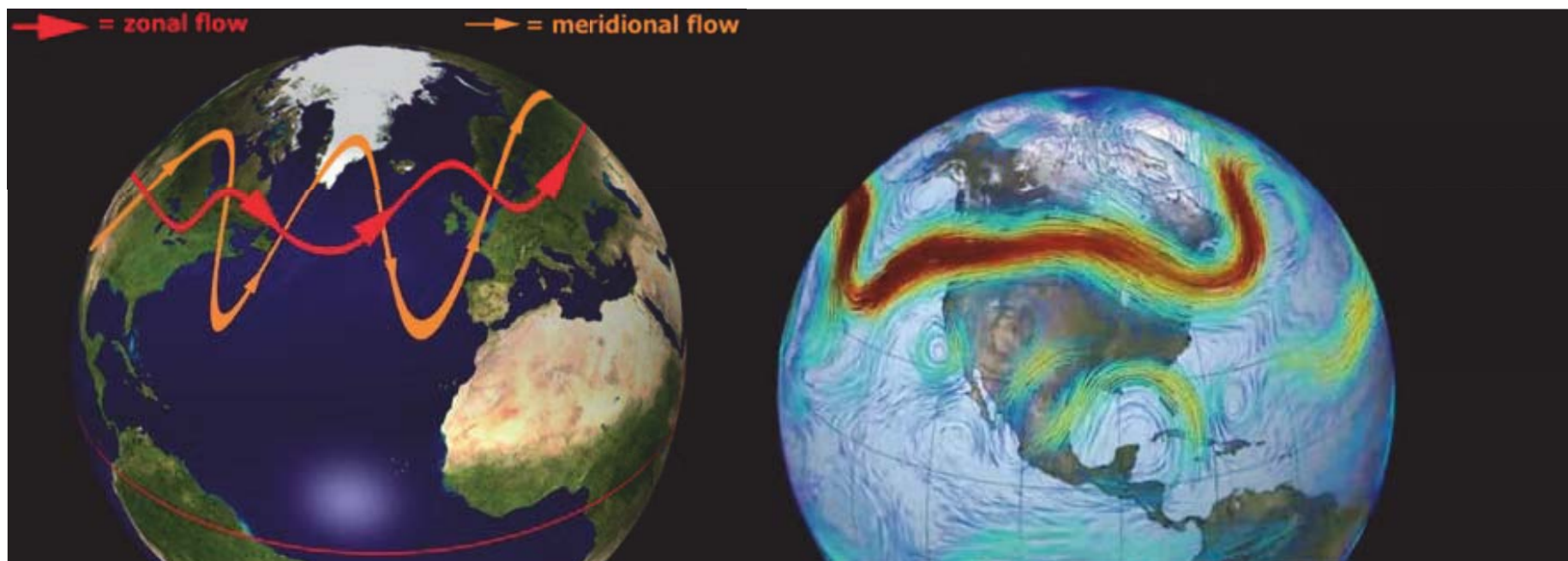


Fig. 1.23 Effects of the positive and negative phases of the Arctic Oscillation (Adapted from R. R. Stuwart 2005, Courtesy: J.M. Wallace)



Polární vír a ovlivnění počasí

- **ovlivnění dráhy polárního jet streamu**
- proměna mezišírkového teplotního gradientu, více nejasný mechanismus
- AO+ vede k zonálnímu charakteru jet streamu
- AO- vede k více meridionálnímu proudění



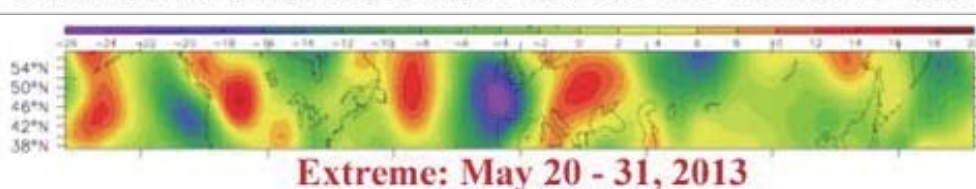
zdroj: <http://www.skepticalscience.com/news.php?n=1967>

zdroj: <http://en.wikipedia.org/wiki/Jetstream>

Polární vír a ovlivnění počasí

- **zonální** proudění přináší rychlejší proměny počasí, průměrné podmínky, západní proudění
- **meridionální** proud je spojen s méně proměnlivým počasím, možné dlouhé epizody abnormálního počasí
- v Evropě situace z počátku léta 2013, anomální jižní přenos vlhkého vzduchu ze Středomoří

North-South Winds at 300 mb in Extreme and Normal Periods



zdroj: <http://www.wunderground.com/blog/JeffMasters>



zdroj: <http://www.skepticalscience.com/news.php?n=1967>



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 atmosféře, 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