

Vliv dlouhotrvající vysoké sluneční/geomagnetické aktivity na tlaková pole zimní severní dolní atmosféry.

Bochníček, J.,¹ Davidkovová, H.,¹ Hejda, P.¹ a Huth, R.²

¹ *Geofyzikální ústav AV ČR v.v.i., Boční II/ 1401, 141 31 Praha 4*

² *Ústav fyziky atmosféry AV ČR v.v.i., Boční II/ 1401, 141 31 Praha 4*

Byl analyzován vliv dlouhotrvající vysoké sluneční a dlouhotrvající vysoké geomagnetické aktivity na rozložení anomálií stratosférických a troposférických tlakových polí zimní severní hemisféry. Analýza zahrnovala 120-ti denní zimní období (1. prosinec – 30. březen) let 1952-2003. Sluneční aktivita byla charakterizována 30-ti denním průměrem Wolfova čísla R, geomagnetická aktivita 30-ti denním průměrem denní sumy indexu Kp. Rozložení anomálií stratosférických tlakových polí je popsáno 30-ti denními anomáliemi geopotenciálních výšek (GPH) na hladině 50 hPa, rozložení anomálií troposférických tlakových polí pak 30-ti denními anomáliemi GPH na hladině 500 hPa. Anomální hodnoty GPH byly získány tak, že od dlouhodobých 30-ti denních průměrů, vypočtených za období let 1970-2003, byly odečteny aktuální 30-ti denní průměry. Data týkající se GPH byla převzata z NCEP/NCAR reanalýzy. Výsledky jsou prezentovány formou kompozitních map, sestavených z rozdílů mezi anomáliemi GPH v obdobích s dlouhotrvající vysokou sluneční/geomagnetickou aktivitou a anomáliemi GPH v obdobích s dlouhotrvající nízkou sluneční/geomagnetickou aktivitou. Statistická významnost jednotlivých kompozitních map byla testována metodou Monte Carlo. Kompozitní mapy stratosférických GPH polí ukázaly v prvních dvou 30-ti denních obdobích na úzkou spojitost mezi vysokou sluneční/geomagnetickou aktivitou a výskytem záporných GPH anomálií v polárních oblastech. Kompozitní mapy troposférických GPH polí pak ukázaly na spojitost mezi vysokou geomagnetickou aktivitou a výskytem kladné fáze severoatlantické oscilace (NAO). Kompozitní mapy troposférických tlakových polí demonstrovaly souvislost mezi vysokou sluneční/geomagnetickou aktivitou a výskytem záporných GPH anomálií nad severním Atlantikem a západním Pacifikem a výskytem kladné anomálie GPH nad severozápadní Evropou.

The effect of high long-lasting solar/geomagnetic activity on pressure fields in the winter northern lower atmosphere

The effect of high long-lasting solar/geomagnetic activity on stratospheric and tropospheric pressure distributions was investigated in the winter Northern Hemisphere. The analysis concerns winter period (December 1 – March 30) in 1952-2003. Solar activity is characterized by 30 day means of R number, geomagnetic activity by 30 day means of daily sum of Kp index. Stratospheric and tropospheric pressure distributions are described by 30 day mean anomalies in geopotential height (GPH) at 50 hPa/500 hPa. GPH anomalies are computed as the difference between the long-term 30 day averages (covering 33 year period, 1970-2003) and actual 30 day averages. Data are taken from the NCEP/NCAR reanalysis. The composite mean maps represent the difference between high and low solar activity and high and low geomagnetic activity. Statistical significance was evaluated using Monte Carlo method. In December and January, stratospheric composite mean maps indicate relationship between high solar/geomagnetic activity and negative GPH anomalies in Polar Regions, whilst tropospheric composite maps show the association between high geomagnetic activity and positive phase of the North Atlantic Oscillation. In February and March, tropospheric composite maps demonstrate the association between high solar/geomagnetic activity and negative GPH anomalies over the north Atlantic, west Pacific and positive GPH anomaly over north-western Europe as well.

ÚVOD

Spojitostí mezi rozložením tlakových polí v severní zimní dolní atmosféře a sluneční aktivitou se zabývala řada prací. Za všechny jmenujme alespoň: Labitzke a van Loon (1988) van Loon a Labitzke (1988), Barnston a Livezey (1989, 1991), Kodera et al. (1991; 2003), Rind a Balachandran (1995), Balachandran a Rind (1995), Balachandran et al. (1999), Haigh (2003, 1996, 1994), Gleisner a Thejil (2003), Gimeno et al. (2003) a Kodera a Kuroda (2005). Geomagnetická aktivita byla dlouhou dobu opomíjena. Příčinou byla široce rozšířená představa, že geomagnetická a sluneční aktivita spolu korelují natolik těsně, že geomagnetickou aktivitu lze brát jako pouhý derivát aktivity sluneční. Práce posledních let však ukázaly, že na časových škálách 1 měsíc a méně, jsou obě

aktivity prakticky nezávislé (Bochnicek et al., 1996; Thejll et al., 2003), takže je lze ve výzkumu problému „Slunce – počasí“ považovat za stejně významné modelátory (Boberg and Lundstedt, 2003, 2002; Bochnicek and Hejda, 2002, 2005; Bochnicek et al., 1999a; Bochnicek et al., 1999b; Palamara and Bryant, 2004; Thejll et al., 2003); Lu et al. (2008; 2007).

Úkolem této práce je vliv obou aktivit na rozložení tlakových polí v dolní atmosféře vzájemně porovnat, a to na časové škále 1 měsíc, která je kratší, než tomu bylo u předchozích prací.

DATA A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

Data týkající se geopotenciálních výšek (GPH) v zimních obdobích (prosinec – březen) let 1951-2003 byla převzata z datového souboru NCEP/NCAR Reanalysis Data, vytvořeného v NCEP/NCAR Camp Springs-Boulder, USA. Z tohoto souboru byla na hladinách 50 hPa a 500 hPa vytvořena množina průměrných 30-ti denních hodnot GPH. Odečtením těchto 30-ti denních hodnot GPH od jejich dlouhodobých průměrů, vytvořených za období let 1970-2003, byly získány anomální hodnoty GPH v jednotlivých 30-ti denních obdobích. Kompozitní mapy 30-ti denních rozdílů anomálií GPH byly sestavovány tak, že v každém 30-ti denním období bylo od 12 let s nejvyšší průměrnou 30-ti denní hodnotou sluneční/geomagnetické aktivity odečteno 12 let s nejnižší průměrnou 30-ti denní hodnotou sluneční/geomagnetické aktivity. Statistická významnost těchto map byla testována metodou Monte Carlo. Úroveň statistické významnosti byla vyznačena stínováním (světlé stínování – 90% a lepší, tmavé stínování – 95% a lepší). Hodnoty Wolfova čísla R a geomagnetického indexu Kp byly převzaty z NOAA Geophysical Data Center, Boulder, USA.

VÝSLEDKY

Stratosféra (50 hPa)

Vliv sluneční/geomagnetické aktivity na rozložení stratosférických anomálií v jednotlivých 30-ti denních zimních obdobích (1. prosinec – 30. březen) vyjadřují kompozitní mapy. V prvních dvou 30-ti denních obdobích (1. prosinec – 29. leden) na obr. 1, v dalších dvou 30-ti denních obdobích (30. leden – 30. březen) na obr. 2.

Z kompozitních map na obr. 1 je patrné, že sluneční i geomagnetická aktivita je v obou 30-ti denních obdobích rané zimy spojena s výskytem silné záporné anomálie GPH, rozprostírající se nad polárními oblastmi. V případě sluneční aktivity se v prvním z těchto období (1. - 30. prosinec) stává tato záporná anomálie statisticky významnou nad Aljaškou, Čukotkou, Beringovo mořem a částí Severního ledového oceánu, v druhém z těchto období (31. prosinec – 29. leden), pak nad severovýchodní Sibiří. V případě geomagnetické aktivity se v prvním období (1. prosinec – 30. prosinec) stává záporná anomálie statisticky významnou nad Čukotkou a v druhém období (31. prosinec – 29. leden) nad Čukotkou a Grónskem.

Obr. 2 ukazuje, že v třetím období (30. leden – 28. únor), tj. v prvním 30-ti denním období pozdní zimy, se rozložení anomálií GPH závislé na sluneční aktivitě liší od rozložení anomálií GPH závislého na geomagnetické aktivitě. Zatímco sluneční aktivita je spojena s rozsáhlou kladnou, statisticky významnou anomálií nacházející se nad polárními oblastmi, geomagnetická aktivita zůstává i nadále spojena se zápornou, nyní však již statisticky nevýznamnou anomálií, nacházející se nad pólem. Ve čtvrtém 30-ti denním období (1. - 30. březen) jsou obě aktivity spojeny s výskytem kladné anomálie nad pólem. Sluneční aktivita s anomálií tentokrát statisticky nevýznamnou, geomagnetická aktivita s anomálií statisticky významnou.

Troposféra (500 hPa)

Závislost troposférických anomálií GPH na sluneční/geomagnetické aktivitě ukazují v prvním a druhém 30-ti denním období (1. prosinec – 29. leden) kompozitní mapy v obr. 3, ve třetím a čtvrtém 30-ti denním období (30. leden – 30. březen) v obr. 4.

Kompozitní mapy v obr. 3 se vyznačují výskytem anomálií GPH nad severním Atlantikem, středním Atlantikem, severním Pacifikem, Beringovo mořem, středním Pacifikem a Sibiří. V mapách spojených se sluneční aktivitou jsou z výše uvedených anomálií v prvním 30-ti denním období (1. - 30. prosinec) statisticky významné pouze kladná anomálie nad Sibiří a východní částí středního Atlantiku. V druhém období (31. prosinec – 29. leden) jsou statisticky významné kladná anomálie nad středním a západním Pacifikem a kladná anomálie nad východním a západním pobřežím středního Atlantiku.

V mapách spojených s geomagnetickou aktivitou jsou v prvním 30-ti denním období (1. -30. prosinec) statisticky významné záporná anomálie nad severním Atlantikem a kladná anomálie nad středním Atlantikem a Sibiří. V druhém období (31. prosinec – 29. leden) jsou statisticky významné záporná anomálie nad severním Atlantikem a severním Pacifikem a kladná anomálie nad středním Atlantikem a západní částí středního Pacifiku.

Z kompozitních map v obr. 4 je zřejmé, že ve třetím a čtvrtém 30-ti denním období (30. leden – 30. březen), tj. v období pozdní zimy, se až na zápornou anomálii GPH nad severním Atlantikem, začala poloha výrazných anomálií měnit. V mapách spojených se sluneční aktivitou se kladné, statisticky významné anomálie GPH, posunuly z jihozápadní Evropy směrem na severovýchod a ze středního Pacifiku nad Severní ledový oceán. Záporná anomálie nad západním pobřežím USA a východním Pacifikem zesílila, stala se statisticky významnou a začala se posouvat západním směrem.

V mapách spojených s geomagnetickou aktivitou se kladné, statisticky významné anomálie GPH přemístily z oblasti nad středním Atlantikem nad severozápadní Evropu a ze západní části středního Pacifiku nad severovýchodní část asijského kontinentu. Záporná, statisticky významná anomálie GPH se z oblasti nad Beringovo mořem přesunula nad pól.

DISKUSE

Kompozitní mapy z raného zimního období (1. prosinec – 29. leden, obr. 1) ukazují na spojitost mezi dlouhotrvající vysokou sluneční/geomagnetickou aktivitou a výskytem výrazných záporných anomálií GPH v polární stratosféře (50 hPa). Výskyt takovýchto anomálií je v souladu s výsledky prací Arnolda a Robinsona (2000, 1998, 2001), podle kterých vysoká sluneční/geomagnetická aktivita způsobí v zimní polární střední a dolní atmosféře změnu teplotních poměrů. Tato změna je překážkou pro šíření planetárních vln z polární troposféry vzhůru do vyšších atmosférických vrstev, takže vzdušné masy ze středních a vysokých šířek se přestávají polární dolní atmosféře mísit. Vzhledem k tomu, že tato část atmosféry není v zimním období dostatečně ozařována Sluncem, dochází v ní proto v takovémto případě k rychlému poklesu teploty, a tedy i tlaku. Tlakové rozhraní je pak místem cirkumpolárního víru. V kompozitních mapách z pozdního zimního období (30. leden – 30. březen, obr. 2) se v polární stratosféře objevují tentokrát kladné anomálie. Příčinou jsou stratosférické ohřevy, které se v pozdní zimě vyskytují velmi často.

Kompozitní mapy popisující rozložení troposférických anomálií GPH (500 hPa) v závislosti na sluneční/geomagnetické aktivitě ukazují, že v raném zimním období (1. prosinec – 29. leden, obr. 3) jsou, jak vysoká sluneční, tak vysoká geomagnetická aktivita spojeny s výskytem anomálií opačných znamének nad Atlantikem. Zápornou nad severním Atlantikem a kladnou nad východní částí středního Atlantiku. Existence tohoto dipólu je známkou kladné fáze severoatlantické oscilace (NAO). Výskyt kladné fáze NAO je v tomto případě zákonitý, neboť podle práce Baldwina a Dunkertona (2001) a Baldwina et al. (2003) je tato fáze důsledkem působení silného stratosférického cirkumpolárního víru (viz. obr. 1) na spodní vrstvy atmosféry.

V pozdním zimním období (30. leden – 30. březen, obr. 4) dochází v troposféře ke změnám lokace některých výrazných anomálií. K těmto změnám však není, bohužel, dosud znám mechanismus, který by tyto změny vysvětlil.

ZÁVĚR

Z kompozitních map na obr. 1 – 4 vyplývá, že mezi oběma dlouhotrvajícími vysokými aktivitami a rozložením anomálií stratosférických a troposférických tlakových polí zimní severní hemisféry existuje na časové škále 1 měsíc zřetelná souvislost, přičemž manifestace této souvislosti je na začátku a sklonku zimy jiná.

Společným rysem prvních dvou 30-ti denních období (1. prosinec – 29. leden, obr. 1-2) je výskyt silného stratosférického cirkumpolárního víru, spojeného s výraznou kladnou fází NAO v troposféře. Stratosférický cirkumpolární vír, stejně jako kladná fáze NAO jsou během působení geomagnetické aktivity výraznější, než tomu je během působení aktivity sluneční. Poloha hlavních anomálií zůstává prakticky neměnná.

Společným rysem následujících dvou 30-ti denních období (30. leden – 30. březen, obr. 3-4) jsou vedle absence stratosférického cirkumpolárního víru také skutečnosti, že až na zápornou tlakovou anomálii nad severním Atlantikem se poloha výrazných anomálií začala měnit, a že statisticky významné poklesy tlaku lze nalézt pouze v troposféře.

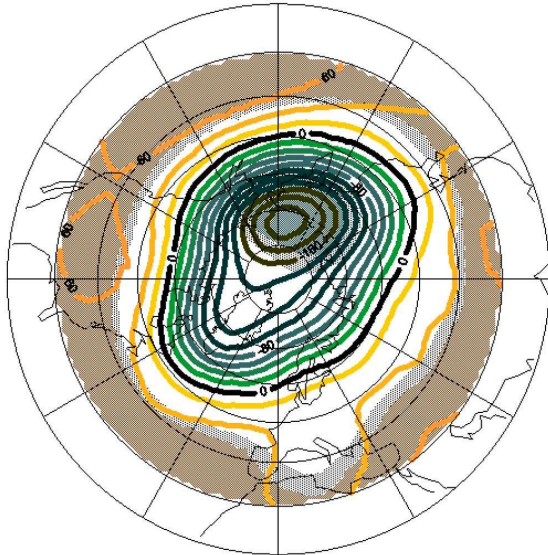
Tato práce byla podpořena grantem AV ČR IAA300420805.

STRATOSPHERE, 50 hPa

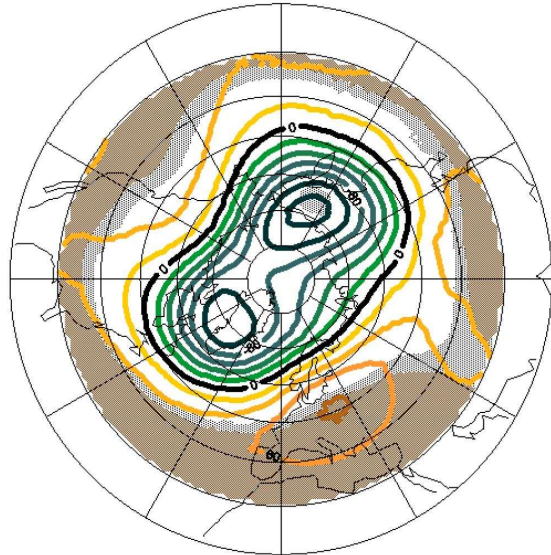
Solar activity

Geomagnetic activity

December 1 – December 30

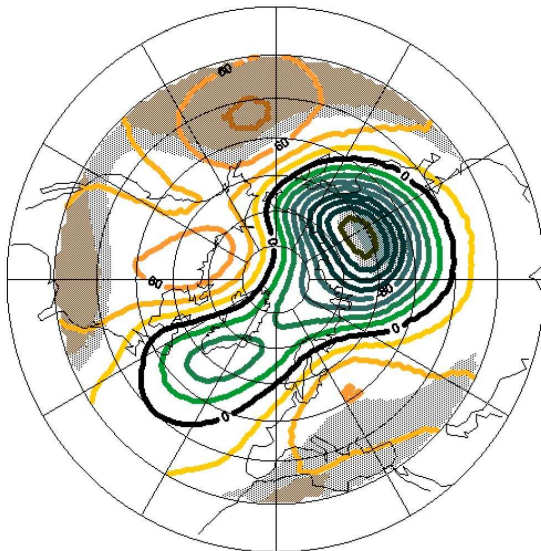


Plus: 56 57 58 79 80 81 82 88 89 90 91 01
Minus: 53 54 63 64 65 75 76 84 85 86 95 96

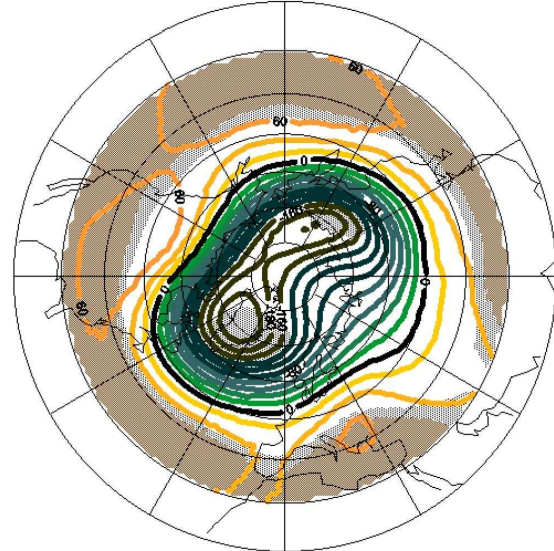


Plus: 51 57 58 59 60 74 82 83 84 89 91 94
Minus: 53 54 55 64 65 69 70 90 95 96 97 00

December 31 – January 29



Plus: 56 57 58 59 67 78 79 88 89 90 91 01
Minus: 53 62 63 64 74 75 76 84 85 86 95 96



Plus: 51 55 57 72 74 78 82 84 88 89 92 93
Minus: 53 61 62 64 65 66 68 69 96 97 00 01

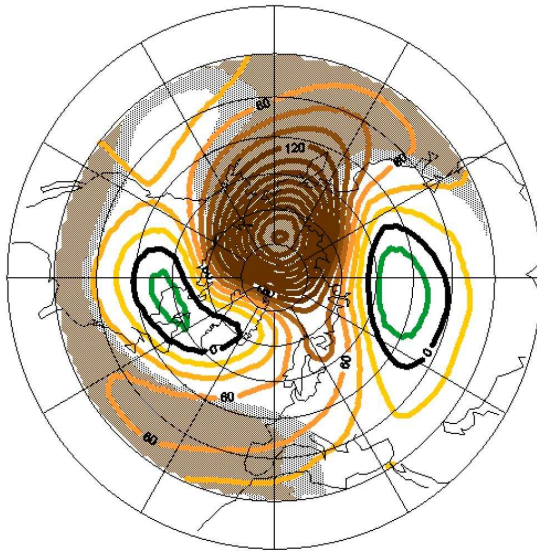
Obr. 1. Kompozitní mapy stratosférických (50 hPa) anomálií GPH v prvních dvou 30-ti denních zimních obdobích (1. - 30. prosinec, 31. prosinec – 29. leden) v závislosti na sluneční a na geomagnetické aktivitě. Úroveň statistické významnosti je vyznačena stínováním (světlé stínování – 90% a lepší, tmavé stínování – 95% a lepší).

STRATOSPHERE, 50 hPa

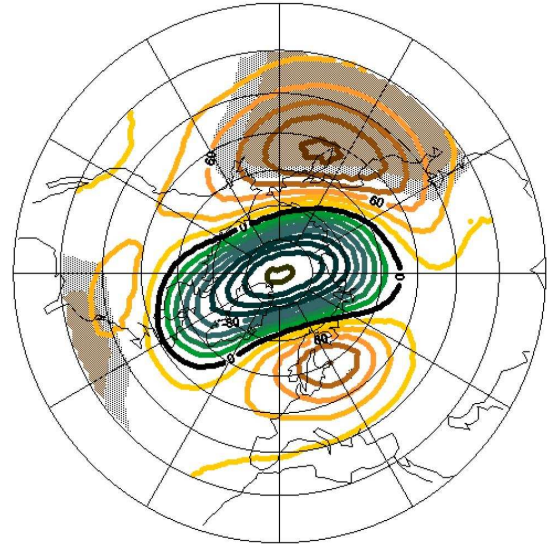
Solar activity

Geomagnetic activity

January 30 – February 28

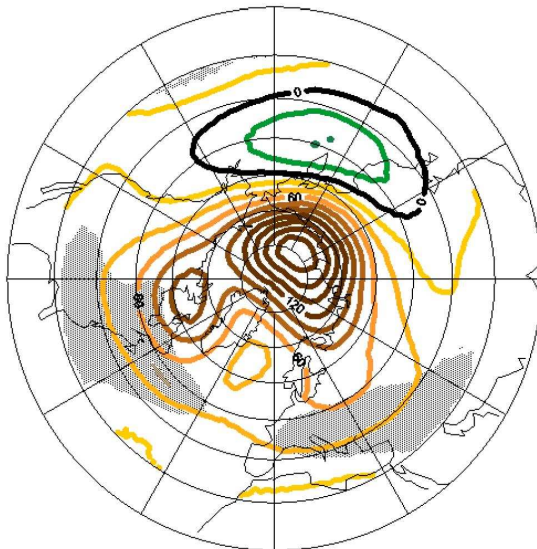


Plus: 57 58 59 70 79 80 81 82 89 90 91 92
Minus: 53 54 55 64 65 75 76 77 85 87 96 97

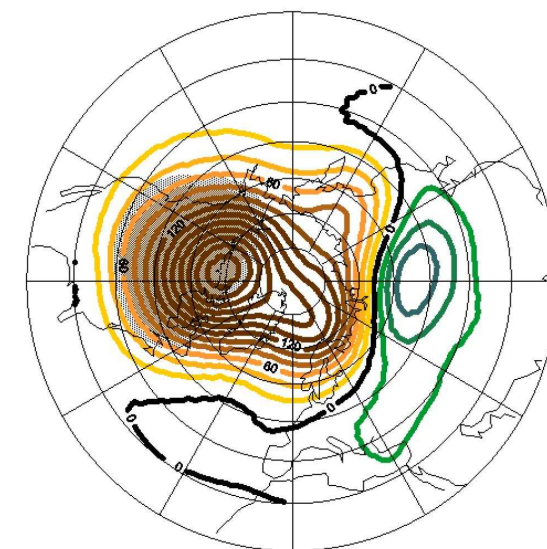


Plus: 52 58 59 73 75 82 83 86 90 92 94 03
Minus: 62 63 65 66 67 70 80 87 98 99 01 02

March 1 – March 30



Plus: 57 58 59 69 79 80 81 82 89 90 91 00
Minus: 53 54 55 63 64 65 75 77 86 87 96 97



Plus: 52 57 58 73 74 89 90 93 94 03
Minus: 62 63 65 66 67 71 80 97 00 02

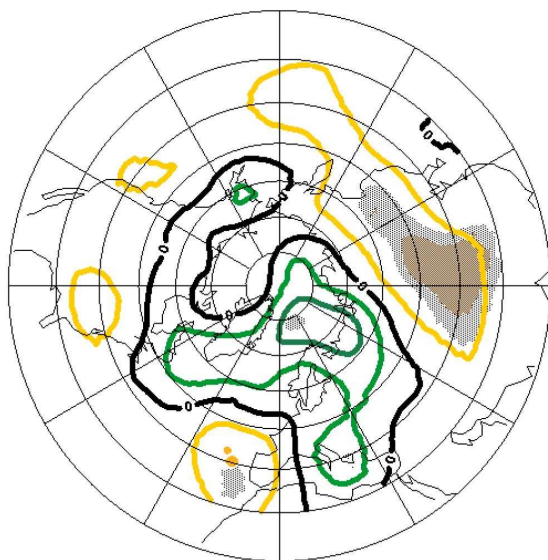
Obr. 2. Kompozitní mapy stratosférických (50 hPa) anomálií GPH v druhých dvou 30-ti denních zimních obdobích (30. leden – 28. únor, 1. březen – 30. březen) v závislosti na sluneční a na geomagnetické aktivitě. Úroveň statistické významnosti je vyznačena stínováním (světlé stínování – 90% a lepší, tmavé stínování – 95% a lepší).

TROPOSPHERE, 500 hPa

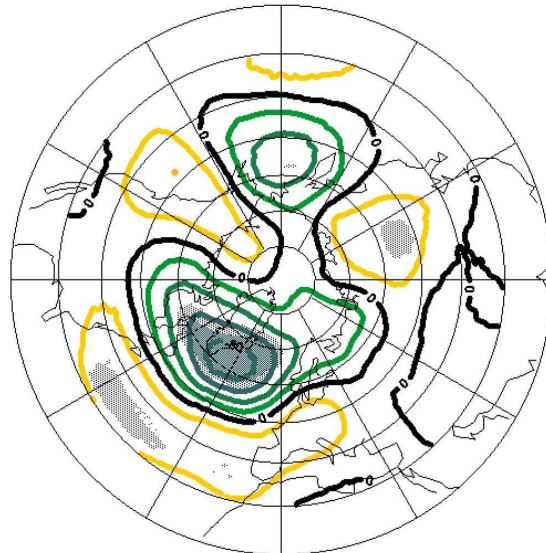
Solar activity

Geomagnetic activity

December 1 – December 30

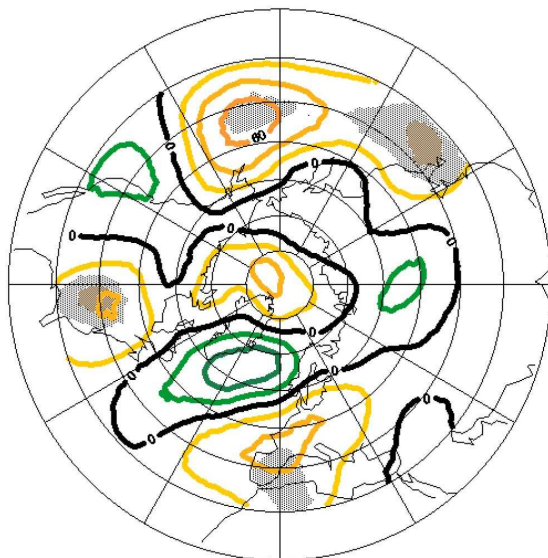


Plus: 56 57 58 79 80 81 82 88 89 90 91 01
Minus: 53 54 63 64 65 75 76 84 85 86 95 96

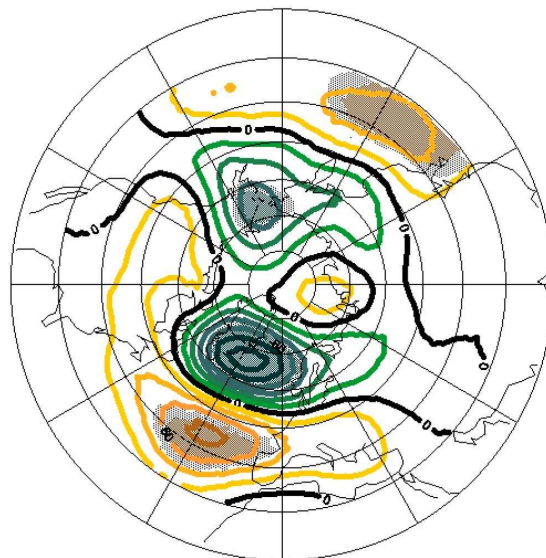


Plus: 51 57 58 59 60 74 82 83 84 89 91 94
Minus: 53 54 55 64 65 69 70 90 95 96 97 00

December 31 – January 29



Plus: 56 57 58 59 67 78 79 88 89 90 91 01
Minus: 53 62 63 64 74 75 76 84 85 86 95 96



Plus: 51 55 57 72 74 78 82 84 88 89 92 93
Minus: 53 61 62 64 65 66 68 69 96 97 00 01

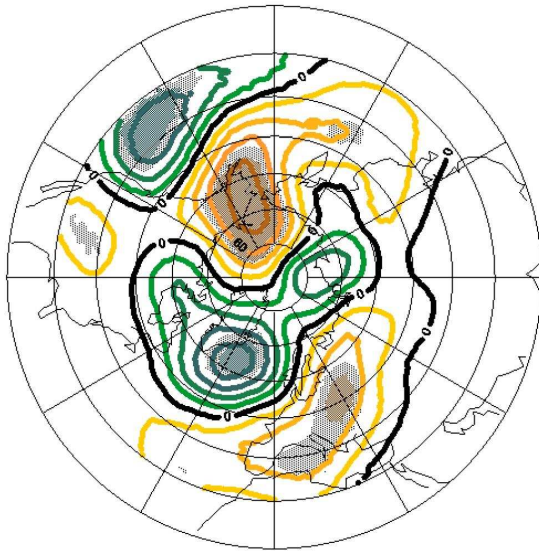
Obr. 3. Kompozitní mapy troposférických (500 hPa) anomálií GPH v prvních dvou 30-ti denních zimních obdobích (1. - 30. prosinec, 31. prosinec – 29. leden) v závislosti na sluneční a na geomagnetické aktivitě. Úroveň statistické významnosti je vyznačena stínováním (světlé stínování – 90% a lepší, tmavé stínování – 95% a lepší).

TROPOSPHERE, 500 hPa

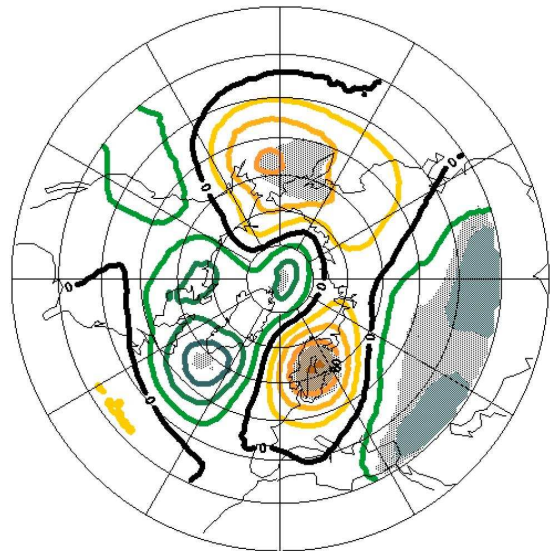
Solar activity

Geomagnetic activity

January 30 – February 28

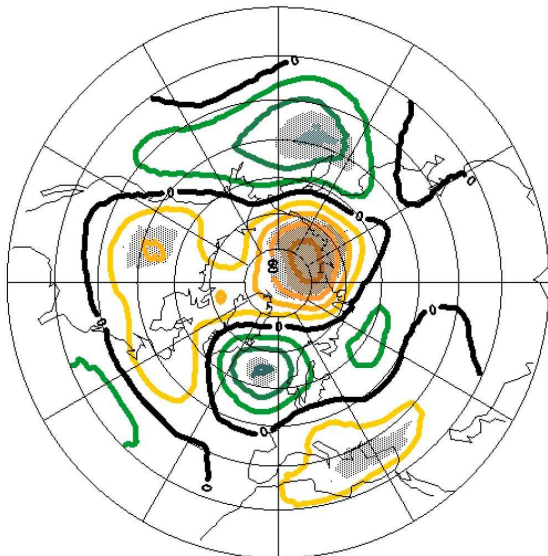


Plus: 57 58 59 70 79 80 81 82 89 90 91 92
Minus: 53 54 55 64 65 75 76 77 85 87 96 97

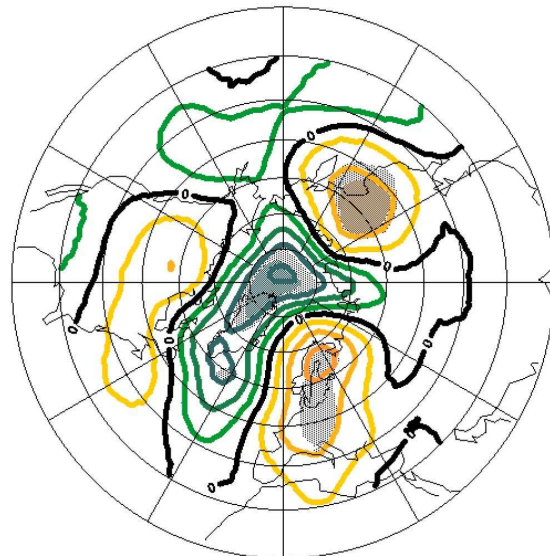


Plus: 52 58 59 73 75 82 83 86 90 92 94 03
Minus: 62 63 65 66 67 70 80 87 98 99 01 02

March 1 – March 30



Plus: 57 58 59 69 79 80 81 82 89 90 91 00
Minus: 53 54 55 63 64 65 75 77 86 87 96 97



Plus: 52 57 58 73 74 89 90 93 94 03
Minus: 62 63 65 66 67 71 80 97 00 02

Obr. 4. Kompozitní mapy troposférických (500 hPa) anomálií GPH v druhých dvou 30-ti denních zimních obdobích (30. leden – 28. únor, 1. březen – 30. březen) v závislosti na sluneční a na geomagnetické aktivitě. Úroveň statistické významnosti je vyznačena stínováním (světlé stínování – 90% a lepší, tmavé stínování – 95% a lepší).

Literatura:

- Arnold, N. F., and Robinson, T. R.: Amplification of the influence of solar flux variations on the winter stratosphere by planetary waves, *Space Science Reviews*, 94, 279-286, 2000.
- Arnold, N. F., and Robinson, T. R.: Solar cycle changes to planetary wave propagation and their influence on the middle atmosphere circulation, *Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences*, 16, 69-76, 1998.
- Arnold, N. F., and Robinson, T. R.: Solar magnetic flux influences on the dynamics of the winter middle atmosphere, *Geophysical Research Letters*, 28, 2381-2384, 2001.
- Balachandran, N. K., and Rind, D.: Modeling the effects of UV variability and the QBO on the troposphere-stratosphere system. 1. The middle atmosphere, *Journal of Climate*, 8, 2058-2079, 1995.
- Balachandran, N. K., Rind, D., Lonergan, P., and Shindell, D. T.: Effects of solar cycle variability on the lower stratosphere anti the troposphere, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104, 27321-27339, 1999.
- Baldwin, M. P., and Dunkerton, T. J.: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 294, 581-584, 2001.
- Baldwin, M. P., Thompson, D. W. J., Shuckburgh, E. F., Norton, W. A., and Gillett, N. P.: Weather from the stratosphere?, *Science*, 301, 317-+, 2003.
- Barnston, A. G., and Livezey, R. E.: A Closer Look at the Effect of the 11-Year Solar Cycle and the Quasi-biennial Oscillation on Northern Hemisphere 700 mb Height and Extratropical North American Surface Temperature, *Journal of Climate*, 2, 1295-1313, 1989.
- Barnston, A. G., and Livezey, R. E.: Statistical Prediction of January-February Mean Northern Hemisphere Lower Tropospheric Climate from the 11-Year Solar Cycle and the Southern Oscillation for West and East QBO Phases, *Journal of Climate*, 4, 249-262, 1991.
- Boberg, F., and Lundstedt, H.: Solar wind electric field modulation of the NAO: A correlation analysis in the lower atmosphere, *Geophysical Research Letters*, 30, 2003.
- Boberg, F., and Lundstedt, H.: Solar wind variations related to fluctuations of the North Atlantic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, 29, 2002.
- Bochnicek, J., Bucha, V., Hejda, P., and Pycha, J.: Relation between Northern Hemisphere winter temperatures and geomagnetic or solar activity at different QBO phases, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58, 883-897, 1996.
- Bochnicek, J., and Hejda, P.: Association between extraterrestrial phenomena and weather changes in the Northern Hemisphere in winter, *Surveys in Geophysics*, 23, 303-333, 2002.
- Bochnicek, J., and Hejda, P.: The winter NAO pattern changes in association with solar and geomagnetic activity, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 17-32, 2005.
- Bochnicek, J., Hejda, P., Bucha, V., and Pycha, J.: Possible geomagnetic activity effects on weather, *Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences*, 17, 925-932, 1999a.
- Bochnicek, J., Hejda, P., and Pycha, J.: The effect of geomagnetic and solar activity on the distribution of controlling pressure formations in the Northern Hemisphere in winter, *Studia Geophysica Et Geodaetica*, 43, 390-398, 1999b.
- Gimeno, L., de la Torre, L., Nieto, R., Garcia, R., Hernandez, E., and Ribera, P.: Changes in the relationship NAO-Northern Hemisphere Temperature due to solar activity, *Earth and Planetary Science Letters*, 206, 15-20, 2003.
- Gleisner, H., and Thejll, P.: Patterns of tropospheric response to solar variability, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1711, 2003.
- Haigh, J. D.: The effects of solar variability on the Earth's climate, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 361, 95-111, 2003.
- Haigh, J. D.: The impact of solar variability on climate, *Science*, 272, 981-984, 1996.

- Haigh, J. D.: The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate, *Nature*, 370, 544-546, 1994.
- Kodera, K.: The solar and equatorial QBO influences on the stratospheric circulation during the early northern hemisphere winter, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1023-1026, 1991.
- Kodera, K.: Solar influence on the spatial structure of the NAO during the winter 1900-1999, *Geophysical Research Letters*, 30, 2003.
- Kodera, K., and Kuroda, Y.: A possible mechanism of solar modulation of the spatial structure of the North Atlantic Oscillation, *J. Geophys. Res.*, 110, D02111, 2005.
- Labitzke, K., and Vanloon, H.: Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 50, 197-206, 1988.
- Loon, H. V., and Labitzke, K.: Association between the 11-Year Solar Cycle, the QBO, and the Atmosphere. Part II: Surface and 700 mb in the Northern Hemisphere in Winter, *Journal of Climate*, 1, 905-920, 1988.
- Lu, H., Clilverd, M. A., Seppälä, A., and Hood, L. L.: Geomagnetic perturbations on stratospheric circulation in late winter and spring, *J. Geophys. Res.*, 113, D16106, 2008.
- Lu, H., Jarvis, M. J., Graf, H.-F., Young, P. C., and Horne, R. B.: Atmospheric temperature responses to solar irradiance and geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 112, D11109, 2007.
- Palamara, D. R., and Bryant, E. A.: Geomagnetic activity forcing of the Northern Annular Mode via the stratosphere, *Annales Geophysicae*, 22, 725-731, 2004.
- Rind, D., and Balachandran, N. K.: Modeling the effects of UV variability and the QBO on the troposphere-stratosphere system. II: The troposphere, *Journal of Climate*, 8, 2080-2095, 1995.
- Thejll, P., Christiansen, B., and Gleisner, H.: On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity, *Geophysical Research Letters*, 30, 2003.