

# Magnetické pole Země a kosmické počasí

Josef Bochníček, Pavel Hejda

Geofyzikální ústav AV ČR, Boční II, 141 31 Paha 4

Zdrojem magnetického pole Země je pohyb elektricky vodivých hmot ve vnějším jádře. Z velikosti jádra a hodnot fyzikálních parametrů vyplývá, že typickou časovou jednotkou těchto procesů jsou tisíce let. Z paleomagnetických výzkumů víme, že pole měnilo mnohokrát v minulosti svou polaritu. Intervaly mezi inverzemi se pohybovaly od desítek tisíců do desítek milionů let. Poslední inverze proběhla před 720 tisíci lety.

Geomagnetické pole lze v prvním přiblížení považovat za dipólové. V současnosti je tento dipól odkloněn o  $11^\circ$  od zemské osy. Geomagnetický pól se na severní polokouli nalézá v Kanadě a jeho zeměpisné souřadnice jsou  $79^\circ\text{N}$ ,  $104^\circ\text{W}$ . V důsledku této excentricity je geomagnetická šířka Severní Ameriky větší než geomagnetická šířka Evropy. Významné jsou i nedipólové složky geomagnetického pole. Zatímco například u nás v současné době intenzita pole překročila 48 000 nT a roste o několik desítek nT ročně, nad jižním Atlantikem a částí Jižní Ameriky zesláblo pole za poslední půlstoletí o 20 % a jeho intenzita je pod 25 000 nT. Jelikož magnetické pole vytváří kolem Země štít proti pronikání vysoce energetických částic, projevuje se toto oslabení zvýšeným výskytem poruch satelitů nad danou oblastí [1].

Zatímco pole vnitřního původu je relativně stabilní, nad zemským povrchem se rychle mění. Příčinou těchto změn jsou magnetická pole elektrických proudů generovaných na povrchu magnetosféry (magnetického obalu Země) slunečním větrem a disipovaných v polární ionosféře. Intenzita proudů v tomto dynamu závisí na výkonu, který se z toku slunečního větru dopadajícího na denní stranu magnetosféry podaří interakčním mechanismům odčerpát. Vzhledem k nízké efektivitě těchto mechanismů to z toku o intenzitě  $\approx 10^{13}$  W obvykle bývá jen několik málo procent. Elektrické proudy transportují odčerpávanou energii do polární ionosféry a na noční stranu magnetosféry. Zatímco v polární ionosféře je energie bezprostředně disipována (formou Jouleova ohřevu), na noční straně magnetosféry je přechodně uchovávána ve formě přírůstku pohybové a tepelné energie magnetosférického plazmatu a ve formě přírůstku magnetostatické energie pole. S růstem magnetostatické energie se však stabilita noční strany magnetosféry snižuje, takže přesáhne-li v ní přírůstek energie pole určitou hranici, naakumulovaná magnetostatická energie se uvolní. Část takto

uvolněné energie výrazně zvýší kinetickou energii částic, zbytek uvolněné energie se přes noční stranu magnetosféry navrátí slunečnímu větru zpět ve formě plazmoidu. Urychlené částice jsou injektovány do prstencového proudu obepínajícího v ekvatoriální rovině Zemi a do ionosféry v oblasti vysokých geomagnetických šířek. Prstencový proud teče ve vzdálenosti několika zemských poloměrů od zemského povrchu a je orientován tak, že jeho magnetické pole stojí v opozici ke geomagnetickému poli na zemském povrchu a snižuje tak (maximálně o 3 %) v nízkých a středních šířkách jeho intenzitu. Vpád urychlených částic do ionosféry zvýší stupeň její ionizace a vyvolá polární záři.

Přesáhne-li odčerpávaný výkon hodnotu  $10^{12}$  W, je magnetosférickému dynamu dodávána energie rychlostí, která je vyšší než rychlost s jakou je magnetosféra schopna přijímanou energii disipovat. Dochází k extrémnímu nárůstu intenzity magnetosférických proudů, který je v oblastech výskytu polární záře doprovázen intenzivním vpádem vysokoenergetických částic do atmosféry. Poruchy geomagnetického pole nabývají globálního charakteru (mluvíme o magnetické bouři) a dosahují amplitud řádu stovek nT [2]. Takovéto poruchy indukují (podle Faradayova zákona) v zemi napěťové rozdíly, které ve vysokých geomagnetických šířkách mohou dosahovat i desítek voltů na kilometr. Vzniklé stejnosměrné proudy ohrožují rozvody elektrické energie, potrubí dopravující ropu a plyn, telekomunikační kabely a zabezpečovací zařízení železnic.

V transformátorech přenosových soustav jsou příčinou nasycení jejich jader, a tím i růstu jalové složky přenášeného výkonu snižující nejen přenosovou kapacitu soustavy, ale i její napětí. Je-li od soustavy vyžadován zvýšený výkon, dochází pak v jejich jednotlivých uzlech k selháním, v limitním případě k celkovému kolapsu [3].

V ropovodech a plynovodech jsou indukované stejnosměrné proudy příčinou zrychlené koroze a tím i růstu nákladů na jejich monitorování.

V telekomunikačních kabelech jsou zdrojem napěťových rázů a výpadků činnosti. Vzhledem k délce podmořských kabelů může napětí indukované během geomagnetických bouří dosáhnout stovek až tisíců voltů. Napěťové fluktuace takovýchto amplitud byly pozorovány nejen na transatlantických/transpacifických kabelech, ale i na kratších kabelech, jako například mezi Ruskem a Japonskem [4].

Na železnici komplikují indukované zemní proudy provoz tím, že narušují činnost signalizačních zařízení. Ve Švédsku v roce 1982 a v Norsku v roce 2000 byly zaznamenány

případy, kdy se signalizační zařízení samovolně sepnula, což v Norsku bylo příčinou vážné železniční nehody. Ta měla za následek 19 smrtelně zraněných.

Částice urychlené do vysokých energií silnými magnetickými poruchami pronikají do blízkého okolí Země, kde jsou příčinou selhávání činnosti družic, snížení přesnosti navigačních systémů, poruch v radiovém spojení, i příčinou zvýšené radiace. Ta ohrožuje zdraví nejen kosmonautů, ale i posádek a pasažérů letadel pohybujících se ve vysokých letových hladinách oblastmi vysokých geomagnetických šířek.

Protony s energiemi 10–100 MeV vyřazují elektronické součástky z činnosti svou radiací, relativistické elektrony ( $\approx 0,2 - 5$  MeV) pak tím, že pronikají do jejich dielektrik a vytvářejí v nich elektrický náboj. Elektrony středních energií ( $\approx 10 - 100$  keV) pokrývají družice povrchovým nábojem. Napět'ové rázy spojené s vybíjením tohoto náboje bývají zdrojem klamných povelů, což má často za následek ztrátu funkce některých přístrojů, výpadky elektrického napájení, či poškození raketového pohonu.

Vpády energetických částic do ionosféry vedou k jejím poruchám, projevujícím se vznikem různých nepravidelností v elektronové koncentraci a rychlými změnami výšky jejího spodního okraje. Vzhledem k tomu, že přesnost navigačních systémů LORAN a OMEGA, pracujících s radiovými vlnami o velmi nízké frekvenci, závisí na přesné znalosti výšky spodního okraje ionosféry, bývají při silných geomagnetických bouřích údaje těchto systémů zatíženy chybou až několik kilometrů. Nepravidelnosti v elektronové koncentraci scintilují radiové signály, takže v radiovém přenosu země-satelit dochází k amplitudovým a fázovým fluktuacím. Ty závažným způsobem snižují přesnost systému určení polohy GPS, a tedy i přesnost sofistikovaných zbraňových systémů.

V radiových přenosech je zvýšenými toky vysokoenergetických částic nejvýrazněji ovlivňováno šíření krátkých vln. Je tomu tak proto, že šíření těchto vln se děje prostřednictvím mnohonásobných odrazů od ionosféry, takže je-li ionosféra narušena, intenzita přijímaného signálu se výrazně sníží. Ve středních a nízkých šířkách je příjem krátkovlnného signálu zatížen úniky, ve vysokých šířkách pak vlivem totální absorpce je jeho příjem znemožněn. Velmi krátké vlny, využívané poslední dobou stále častěji k přenosu dat na velké vzdálenosti prostřednictvím satelitů, procházejí ionosférou jen s malými ztrátami. Při geomagnetických bouřích, a tedy i silných scintilacích, však bývá kvalita přijímaného signálu

natolik degradována, že při vojenských operacích, záchranných akcích a v počítačových sítích, použití takovéhoho pojítka může být znemožněno [5].

Radiace vyvolaná vysokoenergetickými částicemi dosahuje během silných geomagnetických poruch hodnot, které mohou být nebezpečné nejen pro kosmonauty, ale i pro cestující a posádky letadel, přičemž na intenzitu radiace uvnitř letounu mají důležitý vliv trasa, letová výška a typ letadla. Ukázalo se, že při letu z Londýna do New Yorku v Concordu, tj v letové výšce 16 km, byla radiační expozice 2x větší, než při konvenčním letu v letové výšce 10 km, a že lety z Evropy do Severní Ameriky vykazují vyšší radiační expozici, než odpovídající lety směrem východním. V této souvislosti je třeba dodat, že letecká posádka je kvůli oknům pilotní kabiny mnohem více vystavena radiačnímu poli, než cestující v trupu.

Míra radiačního rizika způsobená vysokoenergetickými částicemi výrazně stoupne, je-li geomagnetická bouře způsobena silnou protonovou erupcí. Sluneční částice velmi vysokých energií, tzv. měkké kosmické paprsky, zesilují toky vysokoenergetických částic magnetosférického původu a jsou v zemské atmosféře zdrojem tzv. sekundárního záření, které v oblasti vysokých geomagnetických šířek a výškách nad 10 km dosahuje svého maxima. Nepříznivé působení vysokoenergetických částic slunečního původu je ještě zesíleno tím, že oblasti, do kterých mohou tyto částice proniknout, se během geomagnetických bouří posouvají do nižších geomagnetických šířek.

Pro výše popsané přírodní děje se v poslední době vžilo označení **kosmické počasí** (Space Weather). Podle definice zahrnuje kosmické počasí „podmínky na Slunci, ve slunečním větru, v magnetosféře, ionosféře a termosféře, které mohou ovlivnit činnost a spolehlivost technologických systému v kosmu i na Zemi nebo ohrozit lidské životy a zdraví“.

K monitorování a předpovědi kosmického počasí byla v 90. letech vytvořena světová síť regionálních varovných středisek s řídicím centrem v Boulderu (USA). Praha je sídlem jednoho z jedenácti regionálních center [6]. V rámci této sítě vydává od roku 1994 geomagnetické oddělení Geofyzikálního ústavu AV ČR denní předpovědi proměnlivosti aktivity geomagnetického pole pro oblast střední Evropy.

I když poruchy geomagnetického pole mají svůj původ v dějích na Slunci, není vazba mezi sluneční a geomagnetickou aktivitou tak silná, jak se často předpokládá. Nejmarkantněji se volnost této vazby projevuje v době kolem slunečního minima, kdy relativně nízká sluneční aktivita bývá v opozici s pravidelně se vyskytujícími geomagnetickými poruchami. Zdrojem

těchto poruch jsou proudy vysokorychlostního slunečního větru vycházející z koronálních děr. Rychlost proudů závisí na tvaru, rozloze a umístění koronálních děr na slunečním disku [7]. Pokud tyto útvary zůstávají stabilní, opakují se geomagnetické poruchy každých 27 dní.

Změny geomagnetického pole jsou kvantifikovány indexy. V oblasti nízkých šířek hodinovými indexy Dst, zavedenými v roce 1964 a vystihujícími intenzitu prstencového proudu, v oblasti středních šířek tříhodinovými indexy K, zavedenými v roce 1939 a vystihujícími míru porušenosti geomagnetického pole v daném místě a konečně v oblasti vysokých šířek 2,5 minutovými indexy AE, zavedenými v roce 1966 a vystihujícími proudovou hustotu v systémech magnetosférických proudů, uzavírajících se v polární ionosféře. Indexy jsou vyčíslovány na základě údajů z rozsáhlé sítě nepřetržitě pracujících geomagnetických observatoří. Vzhledem k častému výskytu geomagnetických poruch s amplitudou řádu pouhých jednotek nT, musí být umístění těchto observatoří situováno do míst s nízkou úrovní magnetického šumu industriálního původu. Z tohoto důvodu byla geomagnetická observatoř v šedesátých letech přemístěna z Průhonic u Prahy do Budkova na Prachaticku.

Geomagnetické observatoře plní dvojí úlohu. Na jedné straně poskytují téměř v reálném čase údaje o geomagnetické aktivitě, kde změny mohou dosahovat stovek nT během několika minut, na druhé straně jsou základním zdrojem dat pro sledování změn vnitřního magnetického pole, které se v některých složkách pohybují v jednotkách nT za rok. Aby bylo možno tyto úkoly splnit, jsou nepřetržitá variační měření doplňována přesnými absolutními měřeními. Ke zlepšení kvality měření a rychlé dostupnosti dat přispěla zejména mezinárodní spolupráce v rámci sdružení INTERMAGNET [8].

Předmětem studia je rovněž vliv geomagnetické aktivity na vývoj počasí a klimatu. Zatímco vazba na sluneční aktivitu je trvale v ohnisku pozornosti [9], role aktivity geomagnetické byla v minulosti podceňována. Důvodem byla jednak hypotéza o úzké korelaci mezi oběma aktivitami, jednak neznalost mechanismu, který by uspokojivě vysvětlil způsob, jakým by geomagnetická aktivita mohla chování dolních atmosférických vrstev ovlivnit. I když experimentální výsledky získané již v 70. letech [10-12] naznačily, že souvislost mezi změnami troposférické cirkulace a geomagnetickou aktivitou existovat může, důvody vedoucí k podceňování vlivu geomagnetické aktivity se zdály být odstraněny teprve poté, co bylo ukázáno, že na časových škálách kratších než dva měsíce bývá korelace mezi oběma aktivitami velmi volná [13], co Tinsley [14, 15] předložil model globálního elektrického

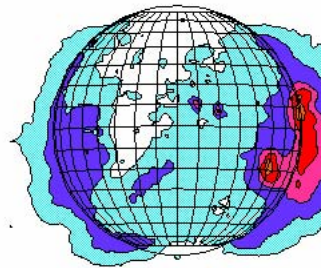
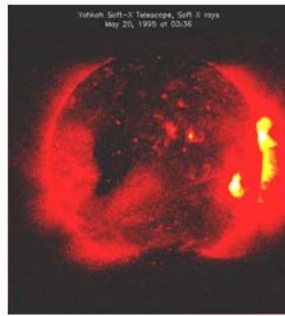
obvodu a co Arnold a Robinson [16] na základě počítačového experimentu prokázali, že geomagnetická aktivita má na zimní cirkulaci vliv, který je srovnatelný s vlivem aktivity sluneční.

V současnosti je vyšetřován vliv geomagnetické aktivity na Severoatlantickou oscilaci (NAO), fluktuace teploty v Evropě a Severní Americe a výskyt El Niño v pacifické oblasti. V rámci tohoto výzkumu byly nalezeny statisticky významné korelace mezi geomagnetickou aktivitou a změnami přízemního tlaku a teploty. Ukázalo se, že zvýšení geomagnetické aktivity vede k zesílení západního zonálního proudění a k fluktuacím teploty v Evropě, Spojených státech a severní Asii. Získané výsledky umožňují učinit závěr, že 80% teplotní variability v Evropě v období květen-červen lze předpovědět z dat, které jsou k dispozici již v únoru [17].

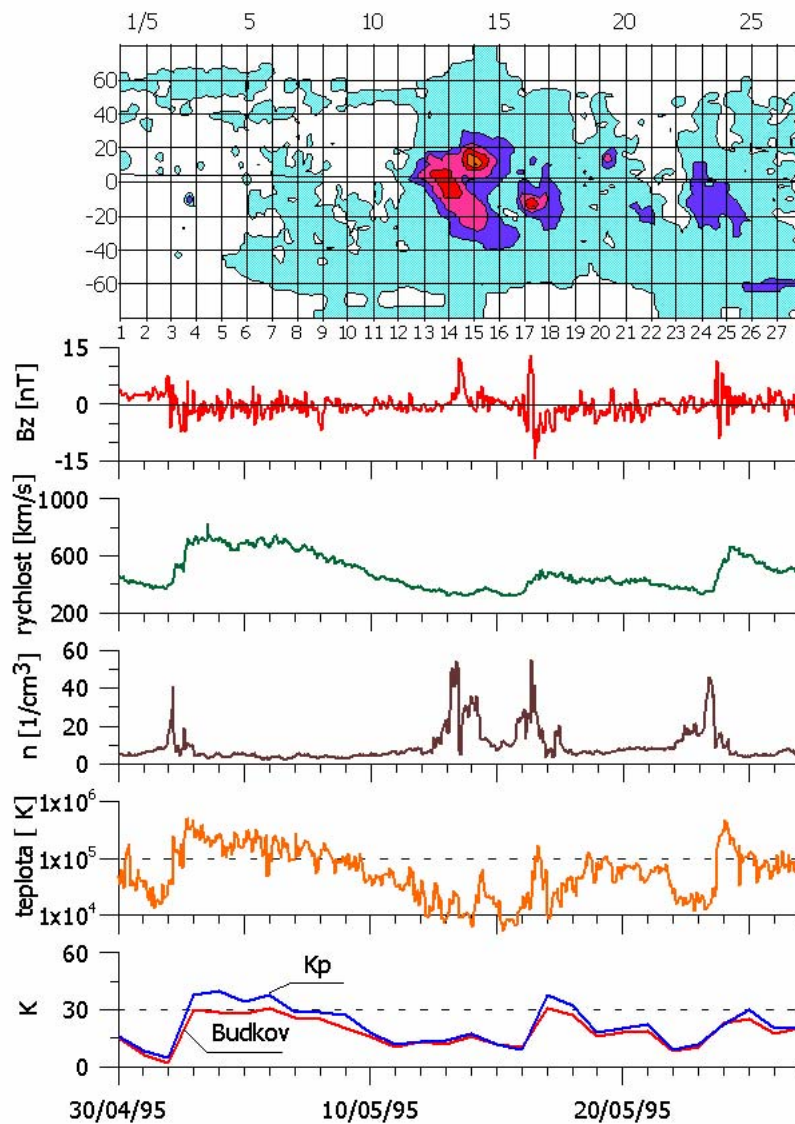
Studium příčin proměnlivosti přízemní globální teploty ukázalo, že v obdobích vysoké geomagnetické aktivity, docházelo nejen k zesílení zonálního proudění, ale i k posunu typických tlakových a teplotních útvarů na synoptických mapách západním směrem [18].

Analýza zimních období, opírající se o padesátiletý datový soubor troposférických teplot a tlaků severní polokoule ukázala, že tyto teploty a tlaky byly ovlivňovány jak sluneční, tak geomagnetickou aktivitou [19, 20]. Analýza dále ukázala, že i když každá z těchto aktivit je za určitých podmínek sama o sobě schopna rozložení atmosférických polí významně ovlivnit, nejvýraznějších efektů je dosahováno tehdy, jsou-li obě aktivity současně vysoké, nebo současně nízké. Při vysokých aktivitách pak dochází k rozložení atmosférických polí obdobnému jako u severoatlantické oscilace kladné (prohlubuje se islandská tlaková níže a zesiluje azorská tlaková výše), při nízkých aktivitách jako u severoatlantické oscilace záporné (vyplňuje se islandská tlaková níže a zeslabuje se azorská tlaková výše).

Zatímco dosavadní studie byly založeny na sezónních – nejméně měsíčních – datech, pro nejbližší období připravujeme výzkum odezvy střední a dolní atmosféry na silné geomagnetické bouře.



20/05/1995 03:35:38



**Děje na Slunci v období slunečního minima a geomagnetická aktivita.** Na snímku slunečního disku provedeném v měkkém rentgenově záření družicí YOHKOH dne 20. května 1995 je zobrazena koronární díra. Její rozsah je lépe viditelný na vedlejší počítačově zpracovaném obrazu. Synoptická mapa sestavená z denních snímků ukazuje průběh celé 27-

denní Bartelsovy rotace č. 2209. Mapa je zrcadlově převrácená, aby časová osa probíhala zleva doprava. Na grafech (odshora dolů) je severo-jížní složka magnetického pole, rychlost, hustota částic a teplota slunečního větru z dat družic umístěných před čelní hranicí magnetosféry. Dolní graf ukazuje geomagnetickou aktivitu vyjádřenou denní sumou K indexů. Planetární indexy, Kp, jsou obvykle o něco vyšší, než indexy observatoře Budkov. Příčinou zvýšení geomagnetické aktivity byly koronární díry zasahující k jednomu z pólů (na mapě bílé oblasti 30.4 – 4.5 a 20.5 – 22.5) a eruptivní protuberance, ke které došlo v aktivní oblasti (červená oblast 12.5-14.5). Interval mezi průchodem koronární díry centrálním poledníkem a její geomagnetickou odezvou je – v závislosti na rychlosti slunečního větru - 3 až 4 dny. Transportní doba oblaku sluneční hmoty vyvrženého z aktivní oblasti bývá 2–4 dny.

### **Literatura:**

- [1] D.N. Baker, in *Space Storms and Space Weather Hazards*, Nato Science Series **38**, 285 (2001)
- [2] W.D. Gonzales, J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroel, G. Rostoker, B.T. Tsuritani, V. Vasyliunas, *J. Geoph. Res.* **99**, 5771 (1994).
- [3] J.G. Kapenman, in *Space Storms and Space Weather Hazards*, Nato Science Series **38**, 335 (2001)
- [4] F. Jansen, R. Pirjola, R. Favre, *Space Weather. Hazard to the Earth?* Swiss Reinsurance Company, Zurich 2000.
- [5] National Space Weather Program. Strategic Plan. FCM/P30/1995, Washington, DC, August 1995
- [6] <http://rwcprague.ufa.cas.cz>
- [7] J. Bochníček, P. Hejda, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **64**, 511 (2002).
- [8] <http://www.intermagnet.org>
- [9] R.E. Benestad: *Solar activity and Earth's Climate*, Springer-Verlag Berlin, 2003.
- [10] J.M. Wilcox, P.H Scherrer, L. Svalgaard, W.O Roberts, R.H. Olson, *Science* **180**, 185 (1973).
- [11] W.O. Roberts, R.H. Olson, *J. Atmos. Sci.* **30**, 135 (1973).
- [12] V. Bucha., *Studia Geophys. Geod.* **20**, 149 (1976).
- [13] J. Bochníček, P. Hejda, V. Bucha , J. Pýcha., *J. Atmos. Terr. Phys.* **58**, 883 (1996).
- [14] B.A. Tinsley, *J. Geomag. Geoelect.* **48**, 165 (1996).
- [15] B.A. Tinsley, *J. Geophys. Res.* **101**, 29701 (1996).
- [16] N.F. Arnold, T.R. Robinson, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2381 (2001).
- [17] V. Bucha, V. Bucha Jr., *Quatern. Int.* **91**, 5 (2002).



[18] V. Bucha , Phys. Chem. Earth **27**, 427 (2002).

[19] J. Bochníček, P. Hejda, J. Pýcha, Studia Geophys. Geod., **45**, 133 (2001).

[20] J. Bochníček, P. Hejda, Surveys in Geophysics **23**, 303 (2002).