

Vysokoenergetické slnečné protóny ako indikátor geomagnetickej aktivity

*F. Valach, Geomagnetické observatórium GFÚ SAV, Hurbanovo, fridrich @geomag.sk
M. Revallo, Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava, geofmire @savba.sk
J. Bochniček, Geofyzikální ústav AV ČR, Praha, jboch @ig.cas.cz
P. Hejda, Geofyzikální ústav AV ČR, Praha, ph @ig.cas.cz*

Abstrakt

Najnovšie poznatky ukazujú, že slnečné erupcie a koronálne tranzienty (CME) môžeme považovať za dva javy, obsiahnuté v jednom procese. Na odhad pravdepodobnosti geomagnetickej odozvy na uvedené slnečné úkazy bol vyvinutý model na báze umelých neurónových sietí. Vstupnými parametrami modelu sú röntgenové erupcie tried B až C, M a X, doprevádzané rádiovými vzplanutiami typu II alebo IV, ako aj heliografické polohy pozorovaných erupcií. Za ďalší indikátor geofektivity CME sa v súčasnosti považuje zvýšenie toku energetických protónov s energiami vyššími ako 10 MeV (SEP event), ktoré nastane približne v čase vzniku CME. V príspevku sme ukázali, že zahrnutie tejto novej informácie do opísaného modelu môže zlepšiť predpovednú schému pre geomagnetickú aktivitu.

1. ÚVOD

Kozmické počasie (KP) môže nepriaznivo ovplyvniť technické zariadenia na palubách satelitov, zdravie ľudí na kozmických lodiach a orbitálnych staniciach, ale aj zdravie cestujúcich a členov posádok diaľkových letov (najmä sa to týka letov vo vysokých letových výškach v polárnych oblastiach). K zmierneniu dopadov KP na techniku a ľudí je potrebné vypracovať spoľahlivé schémy na jeho predpovedanie.

Porušené podmienky v KP v okolozemskom priestore sú dobre pozorovateľné na pozemských geomagnetických observatóriách ako zvýšená geomagnetická aktivita (GA). Najznámejším prejavom silnej geomagnetickej poruchy je tzv. geomagnetická búrka. Za dôležité zdroje zmien KP v období zvýšenej slnečnej aktivity sú dnes považované tzv. koronálne tranzienty (CME z anglického Coronal Mass Ejection) – prudké výrony koronálnej hmoty (napr. Cargill a Harra, 2007). V období minima slnečnej aktivity sa takými významnými zdrojmi stávajú koronálne diery (geomagnetické búrky spôsobené koronálnymi dierami sú však zvyčajne oveľa slabšie ako tie spôsobené koronálnymi tranzientmi).

V súčasnosti je už k dispozícii niekoľko modelov na krátkodobé predpovede geomagnetickej aktivity – predpovede na jednu hodinu až niekoľko hodín dopredu (napr. Boberg a kol., 2000). Zvyčajne sú postavené na poznatkoch a dátach o slnečnom vetre. Rozsiahlejší prehľad o stave takýchto predpovedných modelov

podáva Dorotovič (2008). Informácie o kozmickom žiarení získavané z neutrónového monitora sú ďalším ukazovateľom použiteľným k predpovedi geomagnetickej aktivity (Kudela, 2008).

V predkladanej práci sa zaoberáme možnosťou predpovedať geomagnetickú aktivitu na niekoľko dní (dva až štyri) dopredu. Východiskovým poznatkom pre našu štúdiu bolo zistenie Bochnička a kol. (2007), že ak sa v oblasti blízko centra slnečného disku (vo vnútri oblasti $\pm 30^\circ$ v heliografickej šírke aj heliografickej dĺžke) vyskytne röntgenová erupcia, ktorú doprevádza rádiové vzplanutie typu II a/alebo IV, vtedy je vysoká pravdepodobnosť, že takáto erupcia spôsobí zvýšenú GA, a to v prípade erupcií triedy X, M, dokonca aj B až C. Ďalším kľúčovým východiskom bola práca Gleisnera a Watermana (2006), ktorí navrhli na predpovedanie GA použiť toky vysokoenergetických slnečných protónov ($HEPF \geq 10$ MeV). Ukázali, že zvýšenie toku SEP po začiatku CME môže indikovať silnú geomagnetickú poruchu. Treba podotknúť, že podľa (Smart a Shea, 2003) SEP môžeme rozdeliť na dva typy. Prvým typom sú SEP eventy injektované do medziplanetárneho priestoru z miesta v blízkosti Slnka (tzv. Near-Sun injection event). Dorazia k Zemi za 8 až 80 minút a trvajú len krátko. Druhý typ má spojitost s CME – ide o častice urýchľované na čele rázovej vlny veľmi rýchlych CME. CME s rýchlosťami viac ako 750 km/s produkujú SEP event vždy, pri menších rýchlostiach CME (nad 500 km/s) je výskyt SEP častý. Pretože rýchle CME pokladáme za pravdepodobnú

príčinu najsilnejších geomagnetických porúch, v tejto práci sme stanovili hypotézu, že zahrnutie informácie o tokoch SEP do predpovedného modelu pre GA bude viesť k zlepšeniu úspešností predpovedí.

2. MATERIÁL A METÓDA

V práci sme použili údaje o výskyte rtg. erupcií, o triede rtg. erupcií a výskyte rádiových vzplanutí typu II a IV za obdobie od januára 1996 do septembra 2006. Ďalej sme použili aj integrálne hodnoty pre vysokorýchlostné protóny (HEPF) s energiami väčšími ako 10 MeV za rovnaké obdobie. Zdrojom týchto údajov bolo NOAA, Space Environment Center, Boulder, Colorado, USA. Na základe hodnôt HEPF sme uvažovali dve rôzne miery, ktorými sme popisovali zvýšenie toku SEP:

1. Prvá miera je

$$\Delta \log(F) = \log(F^{\text{post}}/F^{\text{pre}}), \quad (1)$$

kde F^{pre} je minimum toku SEP v 6-hodinovom časovom intervale pred výskytom rtg. erupcie a F^{post} je maximum toku SEP v 12-hodinovom časovom okne ihneď po nástupe erupcie. Podobnú mieru zaviedli vo svojej práci Gleisner a Watermann (2006).

2. Druhou mierou je modifikácia predošlej miery:

$$\Delta \log(\Phi) = \log(\Phi^{\text{post}}/F^{\text{pre}}), \quad (2)$$

kde Φ^{post} je maximum toku SEP v 10-hodinovom časovom okne, pričom časové okno sa začína 12 hodín po nástupe röntgenovej erupcie.

Geomagnetickú poruchu sme klasifikovali podľa štvorstupňovej stupnice na základe sledu geomagnetických planetárnych indexov K_p (Bochníček a kol., 2007). Podľa tejto stupnice geomagnetická odozva na erupciu môže byť odstupňovaná ako silná (S), mierna (M), slabá (W) alebo žiadna.

Metódou, ktorú sme použili v predloženej práci, bola umelá neurónová sieť. Vstupnými parametrami siete boli informácie o rtg. erupciách (ich poloha na slnečnom disku a ich trieda), o doprevádzajúcich rádiových vzplanutiach (typ II a/alebo IV) a zvýšenie toku SEP definované vzťahmi (1) a (2). Výstupom z nášho modelu bola predpovedaná úroveň zvýšenia GA. Algoritmus na tréningový proces pre neurónovú sieť sme upravili tak, aby bol minimalizovaný počet falošných poplachov, a zároveň aj počet chýbajúcich varovaní.

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Výsledky predpovedí sme štatisticky vyhodnotili používajúc Chí-kvadrátovú štatistiku. Za miery úspešnosti

sme zobrali tzv. Cramerovo V , ktoré je definované vzťahom

$$V = (\chi^2)^{1/2} \cdot [N \cdot \min(I-1, J-1)]^{-1/2} \quad (3)$$

a kontingenčný koeficient C , definovaný ako

$$C = (\chi^2)^{1/2} \cdot [(\chi^2 + N)]^{-1/2}, \quad (4)$$

kde χ^2 je tzv. Chí-kvadrát, I a J je počet riadkov resp. stĺpcov kontingenčnej tabuľky, N je počet znakov v štatistickom súbore. Hodnota V alebo C blízko nuly znamená žiadnu súvislosť predpovedí so skutočne pozorovanou GA, naopak hodnota blízko jednej znamená, že predpovede dokonale súhlasia s pozorovanou GA.

Neurónovú sieť sme mali natrénovanú pre päť rôznych verzií vstupných parametrov. V každej verzii boli prvými dvomi parametrami heliografická dĺžka a heliografická šírka miesta s výskytom erupcie. Zvyšné parametre boli:

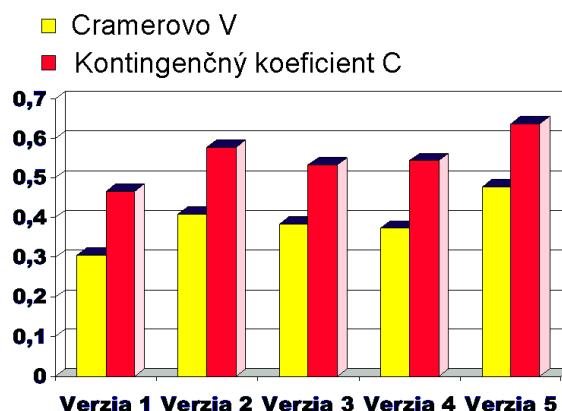
Verzia 1: Trieda rtg. erupcie, Prítomnosť rádiového vzplanutia typu II a/alebo IV.

Verzia 2: $\Delta \log(F)$.

Verzia 3: Trieda rtg. erupcie, Prítomnosť rádiového vzplanutia typu II a/alebo IV, $\Delta \log(F)$.

Verzia 4: $\Delta \log(\Phi)$.

Verzia 5: Trieda rtg. erupcie, Prítomnosť rádiového vzplanutia typu II a/alebo IV, $\Delta \log(\Phi)$.



Obrázok č. 1. Cramerovo V a kontingenčný koeficient C pre päť rôznych verzií modelov (t.j. päť modelov s rôznymi verziami vstupných parametrov). Vzorkami pre tento test boli údaje z rokov 2005 a 2006 – tieto údaje neboli použité na tréning umelých neurónových sietí.

Z porovnania V a C pre našich päť modelov (Obrázok 1) vyplýva, že najlepšie výsledky pri predpovedaní GA sme dostali pomocou tej verzie neurónovej siete, kde vstupnými parametrami bola heliografická poloha erupcie na slnečnom disku, trieda röntgenovej erupcie, informácia o tom, či bola erupcia doprevádzaná rádiovým vzplanutím typu II alebo IV a zvýšenie toku SEP definované vzťahom (2). Je to potvrdením našej

hypotézy, že zahrnutie informácie o vysokorýchlostných protónoch bude viesť k zlepšeniu predpovedí GA.

Podobný výsledok, teda že neurónová sieť so vstupnými parametrami verzie 5 poskytuje najlepšie predpovede GA, sme dostali aj pre vzorky, ktoré boli použité v procese tréningu neurónových sietí a pri hľadaní optimálnej architektúry sietí – boli to údaje z rokov 1996 až 2004. Predpovede úrovni zvýšenia GA pomocou tohto modelu boli správne v 50 až 55 percentách pozorovaných javov, a to pri pomerne nízkom počte falošných poplachov: Pri predpovediach úrovne GA stupňa aspoň W bolo týmto modelom z celkového počtu 93 pozorovaných geomagnetických odoziev pozorovaných 51 (55%), pričom sme sa dopustili 50 falošných poplachov. Pri predpovedaní GA aspoň stupňa M bolo pozorovaných odoziev 72, z nich 36 (t. j. 50%) sme úspešne predpovedali a mali sme 27 falošných poplachov. Pri predpovedaní silných geomagnetických búrok (GA stupňa S) sme z pozorovaného počtu 45 správne predpovedali 23-krát (51%), pričom sme spôsobili 19 falošných poplachov.

4. ZÁVER

Výsledky predloženej štúdie ukazujú, že k efektívnemu predpovedaniu geomagnetickej aktivity na niekoľko dní vopred (zhruba dva až štyri dni vopred) je užitočné medzi sledované parametre zahrnúť okrem informácie o heliografických súradniciach miesta s výskytom erupcie na slnečnom disku, triede röntgenovej erupcie a type rádiového vzplanutia, ktoré erupciu sprevádzalo, aj informáciu o zvýšení toku vysokoenergetických slnečných protónov. Toto zvýšenie je vhodné definovať ako logaritmus podielu maximálnej hodnoty toku $HEPF \geq 10$ MeV v časovom okne s dĺžkou 10 hodín so začiatkom 12 hodín po nástupe rtg. erupcie a minima toku $HEPF \geq 10$ MeV v 6-hodinovom časovom okne pred výskytom rtg. erupcie. V porovnaní s definičným vzťahom (1) umožňuje táto modifikovaná definícia zvýšenia toku SEP vylúčiť z úvah tzv. „Near-Sun injection eventy“, ktoré nepovažujeme za geoeaktívne.

Podakovanie

Tento príspevok vznikol vďaka podpore grantovej agentúry VEGA (granty 2/0023/08 a 2/0043/08), a tiež vďaka grantu IAA300120608 grantovej agentúry AV ČR a projektu IQS300120506 AV ČR. Údaje o slnečných eventoch boli získané z NOAA, Space Environment Center, Boulder, Colorado, USA.

LITERATÚRA

- Boberg F., P. Wintoft a H. Lundstedt: 2000, „Real time Kp predictions from solar wind data using neural networks“, *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science*, 25 (4), pp. 275-280.
- Bochniček J., P. Hejda. a F. Valach: 2007, „Solar energetic events in the years 1996-2004. The analysis of their geoeffectiveness“, *Studia geophys. geod.*, 51, 439-447.
- Cargill P. J. a L. K. Harra: 2007, „Coronal mass ejection“. In: Y. Kamide a A. Chian (Editori), *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 118-132.
- Dorotovič I.: 2008, „Kozmické počasie: slnečný vietor a magnetosféra Zeme“, 19. celoštátny slnečný seminár, Papradno (Považská Bystrica), 12. – 13. máj 2008 (Zb. referátov).
- Gleisner H. a J. Watermann: 2006, „Solar energetic particle flux enhancement as an indicator of halo coronal mass ejection geoeffectiveness“, *Space Weather*, Vol. 4, S06006, doi: 10.1029/2006SW000220.
- Kudela K.: 2008, „IHY 2007 na Slovensku: niektoré aktivity ÚEF SAV v Košiciach“, 19. celoštátny slnečný seminár, Papradno (Považská Bystrica), 12. – 13. máj 2008 (Zb. referátov).