

Aký je mechanizmus extrémnych magnetických porúch v stredných šírkach?

F. Valach¹, P. Hejda², M. Revallo³, J. Bochníček²

¹Geomagnetické observatórium, Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Hurbanovo, fridrich@geomag.sk

²Geofyzikální ústav Akademie věd České republiky, v.v.i., Boční II/1401, Praha

³Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Dúbravská cesta 9, Bratislava

Abstrakt

Donedávna sa za samozrejmosť považovalo, že v silných magnetických búrkach, ktoré sa občas pozorujú v stredných šírkach, hrá dominantnú rolu prstencový prúd – efektívny elektrický prúd, ktorý obteká Zem v západnom smere. V našom príspevku budeme diskutovať o tom, či by príčinou týchto extrémnych javov nemohli byť skôr aurorálne ionosférické prúdy alebo elektrické prúdy súbežné s magnetickými indukčnými čiarami zemského magnetického poľa. Budeme sa pritom opierať o pozorovania magnetických búrok z modernej digitálnej éry, ale aj o historické magnetogramy.

1. ÚVOD

Extrémne tranzientné geomagnetické poruchy vedci študujú už viac ako jeden a pol storočia. Pritom záujem o tieto javy má dôvody, ktoré nie sú len čisto vedecké, ale aj praktické. Rýchle zmeny magnetického poľa totiž už viackrát v minulosti spôsobili značné hospodárske škody, a dokonca môžu predstavovať riziko pre ľudské životy. Dobré známym príkladom takéhoto hospodárskych škôd bola magnetická variácia, ktorá 13. marca 1989 zapríčinila viac ako 9-hodinový výpadok elektrickej rozvodnej siete v kanadskej provincii Québec (Hydro Québec, n.d.). Rizikom pre ľudské životy máme zas na mysli napríklad situácie, keď môžu nastať zlyhania technických či navigačných zariadení na kozmických lodiach, lietadlách a podobne. Preto pochopenie mechanizmov vzniku veľkých magnetických porúch, často nazývaných magnetickými búrkami alebo zvýšenou geomagnetickou aktivitou, je pre modernú spoločnosť veľmi dôležité.

Konkrétne prejavy geomagnetickej aktivity do veľkej miery súvisia s konkrétnym miestom na zemskom povrchu, kde aktivitu pozorujeme. My sa v našom príspevku zameriame najmä na oblasť stredných magnetických šírok. Stredná Európa, vrátane nášho územia, spadá do tejto oblasti.

V našom článku, ktorého cieľom bude zamyslieť sa nad mechanizmom silných geomagnetických porúch, sa postupne zameriame na nasledovné body:

1. Predstavíme najsilnejšiu magnetickú búrku, aká bola kedy zaznamenaná. Pôjde o tzv. Carringtonovu búrku, ktorá bola pozorovaná 2. septembra 1859.
2. Uvedieme v základných rysoch súčasnú fyzikálnu predstavu o mechanizme vzniku magnetických búrok. Kľúčovým pojmom v tomto bode bude okolozemský prstencový prúd.
3. Z dôvodov, ktoré vyplynú z predchádzajúceho bodu, uvedieme aj základné poznatky o magnetosférickej subbúrke.
4. Predstavíme tri ďalšie pozorované extrémne magnetické poruchy, dva novodobé prípady a jeden historický. Pôjde o prípady, ktoré môžu byť užitočné pre ďalší výskum, pretože sa svojimi priebehmi vymykajú zaužívanej predstave o magnetických búrkach v stredných šírkach.

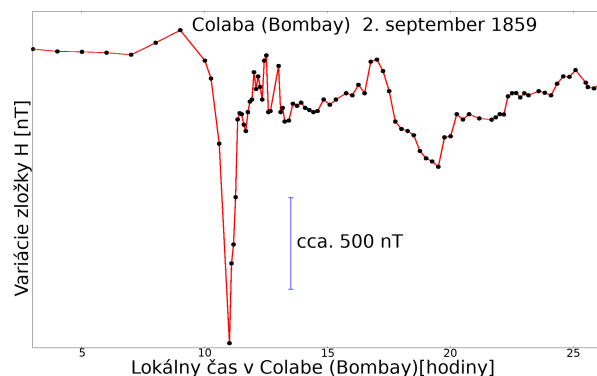
2. CARRINGTONOVA BÚRKA Z ROKU 1859

Najintenzívnejšia geomagnetická búrka, aká bola doteraz zaznamenaná, sa udiala 2. septembra 1859. Stalo sa to 17 hodín a 40 minút po tom, ako anglický astronóm R. C. Carrington, a nezávisle na ňom aj R. Hodgson, spozorovali veľkú slnečnú erupciu (pozri napr. Schwenn, 2006). Pretože Carrington upozornil na možnú súvislosť tejto magnetickej búrky a pozorovanej slnečnej erupcie, táto búrka sa často nazýva Carringtonovou búrkou.

Charakteristickou črtou magnetickej búrky na záznamoch (t. j. magnetogramoch) z geomagnetických observatórií je pokles horizontálnej zložky (tzv. zložky H) geomagnetického poľa. Fáza poklesu horizontálnej zložky sa nazýva hlavnou fázou búrky. Podľa zaužívanej predstavy je hlavná fáza spôsobená zintenzívnením okolozemského prstencového prúdu. Efektívny elektrický prúd v tomto prstenci smeruje na západ a prúdový prstenec sa nachádza zhruba v rovine rovníka vo výške niekoľkých zemských polomerov. Keď uvážime, že zemské magnetické pole na zemskom povrchu v stredných aj nízkych zemepisných šírkach smeruje vo vodorovnej rovine na sever, dôsledkom západne smerujúceho prstencového prúdu je pokles veľkosti zložky H registrovanej na zemskom povrchu.

V čase, keď sa udiala Carringtonova búrka, na rôznych miestach Zeme registrovalo zemské magnetické pole viacero observatórií pomocou registračných staníc. Pokles horizontálnej zložky bol však taký veľký, že všetky registračné aparatury vyšli mimo merací rozsah a žiadna nedokázala zaznamenať celý priebeh.

Našťastie v Colabe (Bombay), v Indii, magnetické observatórium zaznamenávalo hodnoty magnetického poľa ručne vykonávanými pozorovaniami v hustých časových intervaloch. Keď sa v magnetickom poli začala diať zaujímavá zmena, pozorovatelia frekvenciu meraní zvýšili. Tak sa podarilo zaznamenať profil zložky H, ktorý je ukázaný na obr. 1 (podľa Tsurutani a kol., 2003). Veľmi rýchly a hlboký pokles magnetického poľa (cca 1600 nT) sa v Colabe udial krátko pred miestnym poľudním.



Obrázok 1. Horizontálna zložka geomagnetického poľa počas Carringtonovej búrky zaznamenaná na observatóriu Colaba/Bombay v Indii. Tento profil zložky H je nakreslený podľa údajov odčítaných z obrázka č. 3 v práci (Tsurutani a kol., 2003).

Pozemské prejavy tejto veľkej magnetickej poruchy (Odenwald, 2015) boli také silné, že si ich všimla aj laická verejnosť. Išlo najmä o polárnu žiaru, ktorá sa dala pozorovať aj na nezvyčajne nízkych zemepisných šírkach. Ďalším prejavom, ktorý popisovali vtedajšie denníky, boli nezvyčajné javy v telegrafných káblach. Išlo nepochybne o elektrické napätie v dlhých vodičoch, ktoré indukovala rýchla časová zmena magnetického poľa.

V nasledujúcich kapitolách sa budeme zaoberať tým, aké sú príčiny a mechanizmy takýchto intenzívnych magnetických porúch v stredných magnetických šírkach.

3. MECHANIZMUS MAGNETICKEJ BÚRKY

Pozemské magnetické búrky sú spôsobované porušeným slnečným vetrom v kozmickom okolí Zeme. Najvýznamnejšími takými mimozemskými poruchami sú eekcie koronálnej hmoty (často sa pre ne používa anglická skratka CME, odvodená od výrazu coronal mass ejection). Významnými príčinami stredne silných a menej intenzívnych búrok bývajú aj korotujúce interakčné regióny (používaná skratka je CIR z anglického co-rotating interaction region); zvyčajne sa vtedy jedná o rekurentné búrky. Detailne sa tejto slnečnej a medziplanetárnej stránke geomagnetickej aktivity venuje napríklad prehľadová práca Schwenna (2006), ktorej slovenský preklad sa dá nájsť v zborníku referátov z 22. slnečného seminára (Valach a Dorotovič, 2014).

Pre interakciu týchto medziplanetárnych plazmových štruktúr so zemskou magnetosférou je dôležité, že v porovnaní s okolitou plazmou pokojného slnečného vetra, CME a CIR prinášajú okrem hustej a rýchlo sa pohybujúcej plazmy aj zdeformovanú štruktúru medziplanetárneho magnetického poľa.

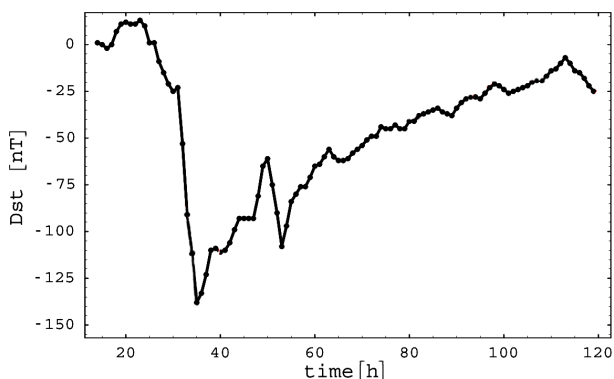
Táto deformácia poľa hrá kľúčovú úlohu, pretože ak medziplanetárne magnetické pole má významnú južnú zložku, dochádza k rekonekcii magnetických indukčných čiar s terestrickými indukčnými čiarami. Slnečný vietor takto dokáže preniknúť cez magnetopauzu, ide o tzv. otvorený Dungeyov model magnetosféry. V dôsledku Lorentzovej transformácie predstavuje tok plazmy slnečného vetra elektrické pole. Keďže magnetosféra je teraz otvorená, toto elektrické pole preniká aj do nej. Elektrické pole má smer od rannej strany magnetosféry k večernej strane magnetosféry. Na druhej strane, terestrické magnetické pole má smer od južnej pologule k severnej.

Vyššie uvedená geometria elektrického a magnetického poľa vedie k tomu, že sa vo vnútri magnetosféry začne prejavovať veľkoškálový $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift. Je to plazmový drift, pri ktorom kladné aj záporné častice podstupujú spoločný pohyb smerom z chvosta magnetosféry k zemskému telesu. Tu na ne čaká magnetická pasca v podobe prstencového prúdu. Pascau to môžeme nazvať preto, lebo dipólová konfigurácia zemského magnetického poľa vo vnútornej magnetosfére vytvára podmienky pre odrážavý pohyb nabitých častíc od magnetických zrkadiel. Takto sú častice zachytené v rovníkovej rovine vo vzdialenosti niekoľkých zemských polomerov od Zeme. Kombináciou rôznych driftových pohybov sú potom častice nútené k pohybu okolo Zeme, kombinovaného s odrážavým kmitavým pohybom pozdĺž indukčných čiar geomagnetického poľa. Výsledkom je efektívny elektrický prúd, ktorý obteká Zem v západnom smere.

Prstencový prúd okolo Zeme obteká aj v čase, keď je geomagnetická aktivita nulová. Vyššie popísaný mechanizmus však zvyšuje počet častíc v prstencovom prúde, a tiež zvyšuje energiu častíc. Zvýšenie hustoty prstencového prúdu na pozemských magnetických observatóriách potom pozorujeme ako pokles horizontálnej zložky geomagnetického poľa. To je hlavná fáza magnetickej búrky.

Efekt prstencového prúdu sa dá najlepšie pozorovať na observatóriách, ktoré sa nachádzajú v nízkych magnetických šírkach. Štandardne sa na kvantifikovanie zmeny magnetického poľa, ktorý pochádza od prstencového prúdu, používa premysleným spôsobom spriemerovaná horizontálna zložka z pozorovaní observatórií Honolulu, San Juan, Hermanus a Kakioka (magnetické šírky 20° až 30°), očistená od rôznych pravidelných variácií, akými je napríklad denná variácia. Získa sa tak búrkový index Dst (napr. Ochaba, 1986; Patel, 1977).

Na obr. 2 je ukázaný časový rad indexov Dst počas magnetickej búrky zo 6. augusta 1998. Zreteľne v ňom vidíme náhly začiatok búrky (tzv. SSC), čo je náhle krátkodobé zvýšenie hodnoty Dst (v úseku okolo časovej značky 20 h). SSC vzniká v dôsledku stlačenia magnetosféry zvýšeným dynamickým tlakom slnečného vetra v čase príchodu porušeného slnečného vetra. Na čele magnetopauzy totiž tečie východným smerom magnetopauzový prúd, ktorý pri priblížení sa k Zemi spôsobí zvýšenie horizontálnej zložky geomagnetického poľa. V časovom úseku od 25 h do 35 h vidíme monotónne klesanie indexu Dst. To je hlavná fáza magnetickej búrky a je spôsobená zintenzívnením prstencového prúdu. V nasledujúcom časovom úseku (od 35 h) sa hodnota Dst postupne vracia do pokojného stavu. Tento proces je dôsledkom postupného rozpadu prstencového prúdu. (Len na krátke obdobie okolo 55 h je tento proces narušený výskytom ďalšej, menšej magnetickej búrky.)



Obrázok 2. Magnetická búrka zo 6. augusta 1998 zaznamenaná pomocou indexu Dst.

Tento typický obraz magnetickej búrky kvantitatívne popisuje klasický model, ktorý publikoval Burton a kol. (1975). Bližšie informácie o tomto modeli sa dajú nájsť napríklad aj v práci (Pulkkinen, 2007). Horizontálnu zložku pozorovanú na nízkych magnetických šírkach v tomto modeli zastupuje index Dst*. Je to Dst index,

z ktorého je odstránený vplyv dynamického tlaku slnečného vetra. Index Dst* preto ešte lepšie popisuje prstencový prúd ako jednoduchý Dst index. Korekčný vzťah pre Dst* je

$$Dst^* = Dst - 7,26 (P_{sw})^{1/2} + 11,0 \text{ nT.} \quad (1)$$

V tomto vzťahu P_{sw} je dynamický tlak a použité sú tu koeficienty, ktoré upresnil O'Brien a McPherron (2000).

Časový vývoj pozemských magnetických prejavov je podľa (Burton a kol. 1975; Pulkkinen, 2007) daný rovnicou

$$dDst^*/dt = Q(t) - Dst^*/\tau, \quad (2)$$

v ktorej t znamená čas, τ je doba, za ktorú sa maximálna depresia indexu Dst* zníži na $1/e$ svojej pôvodnej hodnoty, a $Q(t)$ je funkcia, ktorá popisuje injekciu častíc do prstencového prúdu. Táto hnacia injekčná funkcia je závislá na súčine rýchlosti slnečného vetra a južnej zložky medziplanetárneho magnetického poľa. Keď tento súčin klesne pod kritickú hodnotu 0,49 mV/m, hnacia funkcia nadobudne nulovú hodnotu. Znamená to, že veľkoškálová konvekcia nabitých častíc z chvosta od prstencového prúdu ustane a začne sa rozpad, čiže exponenciálny pokles, prstencového prúdu.

V tomto procese rozpadu prstencového prúdu nachádzame nesúlad medzi teóriou bežnej búrky a pozorovaniami Carringtonovej búrky. Podľa modelu, ktorým Burton a kol. (1975) popisali bežné magnetické búrky, trvá exponenciálne zmenšenie výchylky na $1/e$ maximálnej hodnoty typicky 7,7 hodiny. Avšak, v prípade Carringtonovej búrky sa takýto pokles depresie udial za menej ako 1 hodinu.

Autori, ktorí sa tento rozpor pokúsili vysvetliť, sa delia na dve skupiny: Prvá skupina autorov pokladá aj naďalej Carringtonovu búrku za magneticкую variáciu, ktorú spôsobil prstencový prúd, a vo svojich prácach sa pokúsili zrevidovať mechanizmus rozpadu prstencového prúdu. Buď sa pritom zamerali na úpravy časovej konštanty τ ; napríklad tým, že ju spravili závislou od hodnoty Dst* (pozri Monreal MacMahon a Llop-Romero, 2008, a práce tam citované); alebo sa pokúsili o ešte hlbšiu fyzikálnu rekonštrukciu modelu rozpadu prstencového prúdu (Keika a kol., 2015).

Druhá skupina autorov (Cid a kol., 2015) argumentuje, že Carringtonova búrka nebola magneticкую búrkou v tom zmysle, že by ju bol spôsobil prstencový prúd. Ich vysvetlením je, že išlo o efekt elektrického prúdu, ktorý tiekol pozdĺž magnetických indukčných čiar (v angl. literatúre "field aligned current", my ich tu budeme nazývať "pozdĺžne prúdy"). Je to prúd, ktorý je súčasťou magnetosférickej subbúrky.

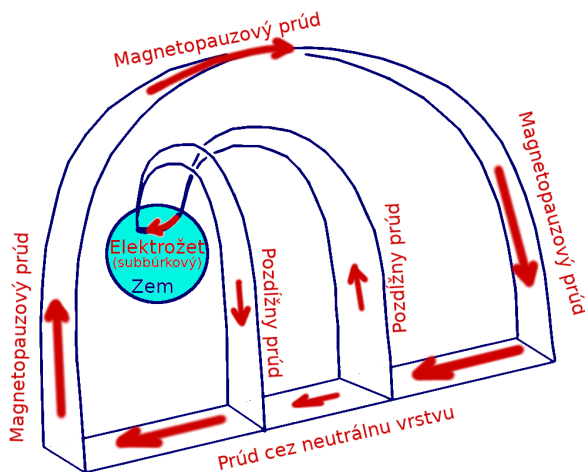
4. MAGNETOSFÉRICKÁ SUBBÚRKA

Prejavy magnetosférických subbúrok v geomagnetickom poli sa pozorujú zvyčajne v polárnych a blízkych subpolárnych oblastiach. Preto by sa mohlo zdať prekvapivým prehlásiť za prejav subbúrky variáciu, ktorá bola pozorovaná nízkoširokým observatóriom (magnetická šírka Colaba je len cca 10°). Na objasnenie tohto javu a jeho možného výskytu

ďaleko od polárnych oblastí uvedieme niektoré informácie o fyzike subbúrky.

Tak, ako v prípade magnetickej búrky, aj pre rozvinutie magnetosférickej subbúrky je dôležitým predpokladom južná orientácia medziplanetárneho magnetického poľa, ktorá vedie k rekonekcii medziplanetárnych a terestrických magnetických indukčných čiar. Do takto otvorenej magnetosféry sa zo slnečného vetra získa veľké množstvo energie, ktorá sa ako magnetická energia akumuluje v chvostových lalokoch. (Lalok je rozsiahla oblasť magnetosférického chvosta medzi plazmovou vrstvou a magnetopauzou. Sú dva laloky, prináležiace severnej a južnej časti zemegule.) Neutrálna vrstva uprostred plazmovej vrstvy vo chvoste (v rovníkovej rovine) je stlačená na menšiu hrúbku pôsobením magnetického tlaku z lalokov. Na druhej strane je však nútená viesť väčší elektrický prúd, pretože prúdové systémy sú zosilnené. Intenzívnejší je aj magnetopauzový prúd, ktorý zvonka obteká magnetický chvost po magnetopauze a uzatvára sa cez neutrálnu vrstvu. Neutrálna vrstva je v normálnom stave vysoko vodivá. Ak sa však v nejakej jej časti prejaví anomálny odpor, dôjde k čiastočnému prerazu. Znamená to, že magnetopauzový prúd sa uzavrie tak, ako to ukazuje obr. 3, elektrický prúd si nájde vodivú cestu pozdĺž magnetických indukčných čiar, ktoré sú spojené s vonkajším okrajom aurorálneho oválu. Okrajom aurorálneho oválu, vo výške rádovo 100 km nad zemským povrchom, takto potečie elektrický prúd západným smerom.

Magnetické observatóriá, ktoré ležia v blízkosti tohto prúdového systému môžu zaznamenať prudké zmeny magnetického poľa. Napríklad počas už spomínanej subbúrky, ktorá v marci 1989 poškodila elektrickú rozvodnú sieť v Québecu, bol pokles horizontálnej zložky geomagnetického poľa viac ako 1000 nT. Typický čas, za aký sa udeje takáto magnetická variácia, je zhruba 1 hodina. Nebezpečie pre pozemské technické zariadenia tkvie v tom, že ide o veľkú zmenu magnetického poľa za krátky čas.



Obrázok 3. Znárodnenie prúdového klinu, ktorý je príčinou vzniku subbúrkového elektrožetu. Obrázok znázorňuje tento jav pre severnú hemisféru.

Magnetické observatóriá v stredných šírkach, napríklad v strednej Európe, zvyčajne počas magnetickej subbúrky pozorujú iba nevelkú kladnú variáciu o veľkosti nanajvyš niekoľko desiatok nT. Nespôsobuje ju však vzdialený subbúrkový elektrožet, ale pozdĺžne elektrické prúdy.

Avšak systém aurorálnych prúdov nie je tvorený len príležitostným subbúrkovým elektrožetom. Neustále sú tam prítomné aj ďalšie dva elektrické prúdy: východný a západný elektrožet. Tie sú napájané systémom ďalších pozdĺžnych prúdov. V čase, keď pretrváva južná orientácia medziplanetárneho magnetického poľa, sú tieto prúdové systémy zosilnené. Od veľkosti tohto komplikovaného systému prúdov závisí veľkosť polárnej čiapky, a teda aj to, ako ďaleko smerom k rovníku siaha aurorálny ovál. Takto sa vo výnimočnom prípade, aký nastal 2. septembra 1859, mohol aurorálny ovál posunúť až tak blízko k magnetickému rovníku, že indické observatórium Colaba zaznamenalo variáciu spôsobenú pozdĺžnymi prúdmi.

O tom, že variácia z 2. septembra 1859 veľmi pravdepodobne súvisela so subbúrkou, svedčí aj množstvo pozorovaní polárnej žiare v ten deň. Žiara bola pozorovaná aj pri veľmi nízkych magnetických šírkach, napríklad až v latinskoamerickej Kolumbii (Cárdenas a kol., 2016).

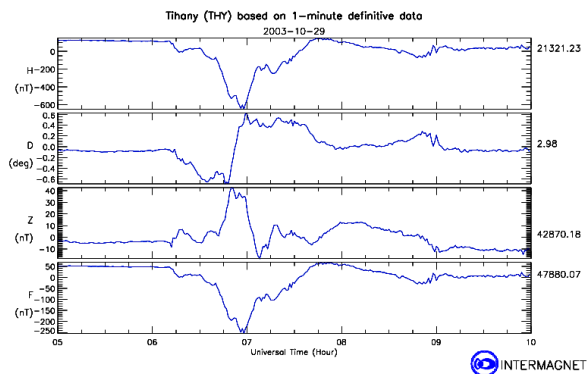
5. VARIÁCIE PODOBNÉ BÚRKE Z ROKU 1859

Cid a kol. (2015) vyslovili predpoklad, že búrok, ktoré by mohli mať podobný charakter ako Carringtonova búrka, sa v minulosti mohlo udiť viacero. Na rozdiel od "prstencových" búrok, ktoré sú globálnym javom, variácie spôsobené subbúrkovými elektrickými prúdmi sú zvyčajne obmedzené iba na isté územie. Preto buď nemuseli byť zaznamenané, ak na danom mieste nebola registrujúca stanica, alebo existujúci záznam doteraz z tejto perspektívy nebol študovaný. V nasledujúcom ukážeme tri zaujímavé geomagnetické variácie, ktoré vykazujú istú podobnosť s Carringtonovou búrkou.

5.1 Dva prípady z digitálnej / družicovej éry

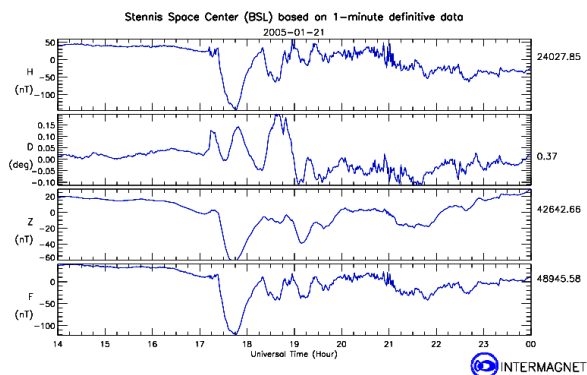
Keď Cid a kol. (2015) označili za pravdepodobnú príčinu Carringtonovej búrky pozdĺžne prúdy, urobili tento svoj objav na základe štúdia inej magnetickej búrky. Išlo o búrku, počas ktorej bol profil horizontálnej zložky geomagnetického poľa morfológicky nápadne podobný profilu Carringtonovej búrky. Táto nová búrka (obr. 4) bola pozorovaná 29. októbra 2003 maďarským observatóriom Tihany. Priebeh hlavnej fázy búrky aj priebeh rozpadu tejto búrky bol porovnateľne rýchly, ako priebeh Carringtonovej búrky. Zároveň išlo o takú rýchlosť variácie, ktorá je typická pre subbúrky. Tihany je strednošírkové observatórium (magnetická šírka cca 46°), teda prudká depresia horizontálnej zložky bola zaznamenaná v stredných magnetických šírkach, čo si

nevyžadovalo až také veľké zväčšenie polárnej čiapky, ako v roku 1859.



Obrázok 4. Záznam geomagnetického poľa z observatória Tihany (Maďarsko) 29. októbra 2003. Horný panel znázorňuje horizontálnu zložku, pod ním je zakreslená magnetická deklinácia, predposledný panel zachytáva vertikálnu zložku a spodný panel ukazuje totálne pole (t. j. veľkosť vektora magnetickej indukcie). Obrázok je získaný z webovej stránky projektu INTERMAGNET.

Napriek tomu, že pozorovaná depresia horizontálnej zložky geomagnetického poľa bola v Tihany zhruba len polovičná v porovnaní s depresiou v Colabe, búrka z Tihany má veľký význam pre ďalšie štúdium mechanizmov extrémnych búrok. Hlavným dôvodom je dostupnosť veľkého množstva digitálnych údajov o geomagnetickom poli z celej zemegule, veľké množstvo družicových meraní medziplanetárneho magnetického poľa a meraní parametrov slnečného vetra, existujúce družicové pozorovania vo vnútri magnetosféry, a aj množstvo pozorovaní Slnka (ejekcii koronálnej hmoty a pod.). To umožňuje pre tento extrémny úkaz študovať celý kauzálny reťazec od Slnka až k pozemským prejavom (napr. Cid a kol., 2015).



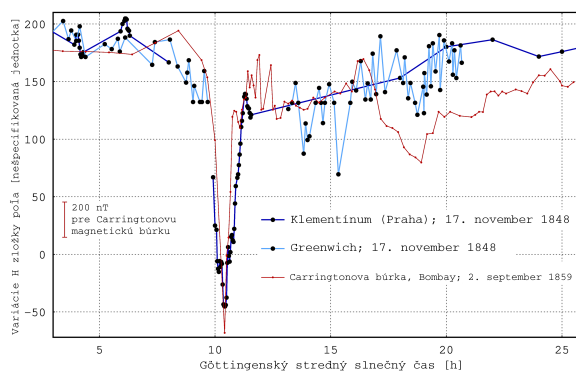
Obrázok 5. Záznam geomagnetického poľa z observatória Stennis Space Center (USA) 21. januára 2005. Horný panel znázorňuje horizontálnu zložku, pod ním je zakreslená magnetická deklinácia, predposledný panel zachytáva vertikálnu zložku a spodný panel ukazuje totálne pole. Obrázok je získaný z webovej stránky projektu INTERMAGNET.

Ďalším novodobým prípadom búrky Carringtonovho typu je variácia poľa, ktorú pozorovali 21. januára 2005 na americkom observatóriu Stennis Space Center

(magnetická šírka cca 40°). Hoci tu bola depresia horizontálnej zložky len približne 150 nT (obr. 5), aj tento prípad predstavuje dobrú príležitosť na štúdium celého reťazca javov od Slnka až k zemskému povrchu (Saiz a kol., 2016).

5.2 Búrka pozorovaná v Prahe v roku 1848

Hoci výhodami búrok z družicovej éry je možnosť študovať tieto javy v súvislosti s ich solárnymi a medziplanetárnymi príčinami, len niekoľko desaťročí trvania družicovej éry nepredstavuje dlhé obdobie. Keďže extrémne búrky sú pomerne vzácnym javom, má zmysel pátrať po nich aj v historických záznamoch spred družicovej éry. Aj keď sa pri nich zvyčajne nedá podrobne študovať súvislosť s medziplanetárnym prostredím, poskytujú prinajmenšom dôkaz o existencii takýchto úkazov.



Obrázok 6. Záznam variácie horizontálnej zložky geomagnetického poľa z observatória Klementinum (Praha) 17. novembra 1848. V obrázku je pre porovnanie naznačený profil Carringtonovej búrky. Doplnený je tiež záznam z Observatória Greenwich. Záznamy z Greenwich a Coloby (Bombay) sú uvedené len pre porovnanie; zakreslené sú v zmenenej mierke a sú posunuté v zvislom smere. Navyše, záznam z Coloby je z inej doby; na časovej osi je posunutý takým spôsobom, aby koincidovali časy maximálnej depresie magnetického poľa. Dopĺňajúce údaje z Greenwich taktiež iba naznačujú možný priebeh časového radu v Prahe; kvôli rozdielnym magnetickým súradnicám však nimi nemožno chýbajúce pražské údaje plne nahradiť.

V záznamoch historického pražského observatória Klementinum sme objavili variáciu horizontálnej zložky, ktorá mala profil podobný ako Carringtonova búrka (Valach a kol., 2017). Záznam (obr. 6) bol urobený 17. novembra 1848. Depresia magnetického poľa s istotou ďaleko presiahla 200 nT, čo je klasifikované ako superbúrka. Dopady tejto variácie na pozemské prostredie boli zaujímavé, ako naznačuje informácia z dobovej tlače (Odenwald, 2015, str. 16). Spomína sa v nej nezvyčajné správanie telegrafného aparátu na spojení medzi Florenciou a Pisou. Klikacie zariadenie bolo k aparátu prilepené, akoby bolo zmagnetizované. Pritom prijímač na druhom konci linky nebol aktívny. Bol to zrejme dôsledok veľkých geomagneticky indukovaných prúdov v dlhom elektricky vodi-

vom telegrafnom kábli. Náš dohad o tom, že išlo o variáciu spôsobenú subbúrkovým prúdovým systémom, a nie prstencovým prúdom, podporuje fakt, že súčasne s tým, ako sa udial incident s telegrafom, boli pozorované aj polárne žiare, čo naznačuje blízkosť aurorálneho oválu. Ďalšími znakmi, že išlo zrejme o subbúrku, je tvar a doba trvania variácie.

6. ZÁVER

V našom článku sme popísali dnešný pohľad na mechanizmy extrémnych variácií geomagnetického poľa. Nie je spochybňované, že klasické geomagnetické búrky, ktoré by sme mohli nazvať "prstencové", alebo prstencovým prúdom spôsobené, typicky predstavujú v stredných magnetických šírkach veľmi intenzívne variácie geomagnetického poľa. Súčasne sa však objavuje aj názor, že mnohé z náhlych a veľmi intenzívnych strednošírkových depresíí horizontálnej zložky magnetického poľa môžu mať aj inú príčinu ako prstencový prúd. Tou príčinou môžu byť elektrické prúdy spojené s aurorálnym oválom či subbúrkami, najmä ide o pozdĺžne prúdy a subbúrkový elektrožet.

V krajinách s územiami v blízkosti polárneho kruhu sú takéto magnetické variácie dobre známe ako reálne nebezpečenstvo. Hrozbu predstavujú geomagneticky indukované prúdy, ktoré sú následkom prudkej časovej zmeny magnetického poľa. Pretože takéto úkazy sa môžu výnimočne prejaviť aj v stredných magnetických šírkach, môžu byť socio-ekonomickou hrozbou aj pre stredoeurópske krajiny. V tom spočíva dôležitosť štúdia mechanizmov geomagnetických variácií, a to búrok aj subbúrok.

Pod'akovanie

Práca bola vypracovaná s podporou projektov slovenskej grantovej agentúry VEGA č. 2/0002/17 a 2/0115/16 a projektu č. GA17-19877S Grantovej agentúry Českej republiky (GAČR). Výsledky prezentované v tejto štúdii sa spoliehajú na údaje zaznamenané observatóriami Tihany a Stennis Space Center. Ďakujeme Maďarskému geologickému a geofyzikálnemu ústavu a Geologickej službe Spojených štátov za to, že podporujú ich prevádzku a INTERMAGNET-u za presadzovanie vysokých štandardov pri vykonávaní geomagnetických pozorovaní (www.intermagnet.org).

LITERATÚRA

Burton R. K., McPherron R. L., Russell C. T. (1975), An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst,

- J. Geophys. Res., 80, 4204–4214.
- Cárdenas F. M., Sánchez S. C., Domínguez S. V. (2016), The grand aurorae borealis seen in Colombia in 1859, *Advances in Space Research*, Volume 57, Issue 1, Pages 257-267, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.08.026>, Dostupné na internete: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311771506109>>
- Cid C., Saiz E., Guerrero A., Palacios J., Cerrato Y. (2015), A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5, art. no. A16, DOI: 10.1051/swsc/2015017.
- Hydro Québec: ([bez dátumu]), In March 1989, Québec experienced a blackout caused by a solar storm, [online], [cit. 2018-04-19], Dostupné na internete: <<http://www.hydroquebec.com/learning/notions-de-base/tempete-mars-1989.html>>
- Keika K., Ebihara Y., Kataoka R. (2015), What caused the rapid recovery of the Carrington storm? *Earth, Planets and Space*, 61, 1, art. no. 65, DOI: 10.1186/s40623-015-0234-y.
- Monreal MacMahon R., Llop-Romero C. (2008), Ring current decay time model during geomagnetic storms: a simple analytical approach, *Ann. Geophys.*, Volume 26, Issue 9, pp. 2543-2550, <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2543-2008>.
- O'Brien T. P., McPherron R. L. (2000), An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay, *J. Geophys. Res.*, 105, 7707.
- Odenwald S. (2015), *Solar Storms: 2000 years of human calamity!* CreateSpace Independent Publishing Platform (Sten Odenwald), ISBN-10: 1505941466, ISBN-13: 978-1505941463.
- Ochaba Š. (1986), *Geofyzika*, Slovenské pedagogické nakladateľstvo Bratislava.
- Patel V. L. (1977), *Ilustrovaný slovník termínov slnečnej a slnečno-zemskej fyziky*, Vydáný pod vedením A. Bruzeka a C. Durranta. Slovenský preklad: Š. Knoška, V. Rušin a M. Rybanský, Slovenské ústredie amatérskej astronómie Hurbanovo, 1983.
- Pulkkinen T. (2007), *Space Weather: Terrestrial Perspective*, *Living Rev. Sol. Phys.*, [online], 4, 1. [Citované: 24. marec 2018], Dostupné na internete: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2007-1>
- Saiz E., Guerrero A., Cid C., Palacios J., Cerrato Y. (2016), Searching for Carrington-like events and their signatures and triggers, *J. Space Weather Space Clim.* 6 A6. DOI: 10.1051/swsc/2016001
- Schwenn R. (2006), *Space Weather: The Solar Perspective*, In: *Living Rev. Solar Phys.*, [online], 3, 2. [Citované: 20. marec 2014], Dostupné na internete: <<https://link.springer.com/article/10.12942/lrsp-2006-2>>, Slovenský preklad: Valach F., Dorotovič I. (prekladatelia) (2014), In: *Zborník referátov z 22. celoštátneho slnečného seminára - príloha*, Nižná Nad Oravou, [online], [cit. 2018-04-19], Dostupné na internete: <http://stara.suh.sk/obs/slnsem/22css/24_priloha.pdf>
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Lakhina G.S., Alex S., (2003), The extreme magnetic storm of 1-2 September 1859, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108, A7, art. no. 1268, DOI: 10.1029/2002JA009504.
- Valach F., Dorotovič, I. (2014), *Kozmické počasie zo slnečnej perspektívy: predstavenie slovenského prekladu prehľadového článku profesora Rainera Schwenna (abstrakt)*, In: *Zborník referátov z 22. celoštátneho slnečného seminára v Nižnej nad Oravou*, 26-35. máj 2014, Ed. I. Dorotovič, Vydala Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo. ISBN: 978-80-85221-80-0.
- Valach F., Hejda P., Bochníček J., Revallo M. (2017), Possible dominance of auroral ionospheric currents in some extreme mid-latitude magnetic storms: Preliminary results of searching through selected historical geomagnetic observations. Vienna, EGU General Assembly 2017, DOI:10.13140/RG.2.2.33293.74726.