

NAJSILNEJŠIA Z MAGNETICKÝCH BÚROK 20. STOROČIA V MÁJI 1921 – ZÁZNAM Z OBSERVATÓRIA STARÁ ĎALA

Eduard KOČI¹ – Fridrich VALACH²

ABSTRACT

The ‘New York Railroad Storm’ of May 1921 resulted in one-order-of-magnitude-faster variations of the geomagnetic field than the famous storm which in 1989 caused extensive damage to the electrical grid in Quebec. The magnetogram catching declination and vertical intensity for the storm of May 1921 by the Stará Ďala observatory was preserved, but the scales of the plotted graphs were provided neither in magnetogram itself nor in other sources. Our goal was to determine the missing scales by using data from both before and after the studied event and reconstruct the magnetogram. Although the preserved record does not cover the entire storm, it still shows extremely large variations of the field: in declination up to almost 1° in less than 1 hour (followed by going out of range), in the vertical component an increase of up to 85 nT in less than 3 hours (after returning to the measuring range).

KEYWORDS

Geomagnetic observatory, geomagnetic storm, geomagnetic field, magnetogram, magnetic declination, vertical intensity.

ÚVOD

Dnešná vysoko technicky rozvinutá spoločnosť je do stále väčšej miery ohrozovaná extrémnymi prejavmi kozmického počasia, z ktorých významné miesto zaujíma jav zvaný magnetická alebo geomagnetická búrka [1]. V tomto príspevku sa budeme zaoberať mimoriadnou magnetickou búrkou, ktorej príčinou bola extrémna slnečná búrka známa ako „Veľká búrka“ alebo „Newyorská železničná búrka“. V pozemskom magnetickom poli sa prejavila 13. až 15. mája 1921 a časť jej priebehu bola zaznamenaná aj v bývalom Československu na geomagnetickom observatóriu Stará Ďala, starším názvom Ógyalla, neskoršie Hurbanovo [2].

Význam starodávskéhó záznamu pre štúdium tohto mimoriadneho úkazu môže byť veľký, pretože najbližšie geomagnetické observatóriá v tom období boli od Starej Ďaly vzdialené až cca 500 km. Boli to tieto observatóriá: na juhu Pula (resp. Pola) na Istrijskom polostrove v Chorvátsku – 473 km [3], na západe Mníchov v Nemecku – 493 km [4] a na severe Swider v Poľsku – 520 km [3]. Smerom na východ boli iné geomagnetické observatóriá ešte vzdialenejšie. Starodávské pozorovania boli teda jedinými v pomerne rozsiahlej časti Európy.

Zdokumentovaným dôsledkom tejto magnetickej búrky bol napríklad aj požiar na telegrafnej stanici v Karlstade vo Švédsku 15. mája 1921 o druhej hodine rannej miestneho času (00:00 UT) [5]. Príčinou požiaru museli byť geomagneticky indukované prúdy (tzv.

1 Mgr. Eduard Koči, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo a Ústav vied o Zemi SAV, v. v. i., Hurbanovo, eduard.koci@suh.sk
2 Mgr. Fridrich Valach, PhD., Ústav vied o Zemi SAV, v. v. i., Hurbanovo, fred.valach@gmail.com

GIC) vyvolané mimoriadne prudkou časovou zmenou veľkosti geomagnetického poľa, ktorá počas impulzívnej variácie mohla byť až ~5000 nT/min [6]. Táto hodnota je hrozivá, keď si uvedomíme, že je to o rád viac ako 13. marca 1989, keď boli nenávratne zničené veľké transformátory elektrickej rozvodnej siete v Quebecku. (479 nT/min podľa [6]).

Pôvodcu extrémnej geomagnetickej aktivity, ktorá bola pozorovaná na Zemi, treba samozrejme hľadať v slnečnej aktivite. V štúdiu [7] bol prezentovaný pokus porozumieť extrémnej slnečnej búrke prostredníctvom zmeny komplexnosti (zložitosti) slnečného magnetického poľa. Študovaná bola aktívna oblasť mountwilsonským číslom 1842, ktorá sa na východnom limbe, t. j. východnom okraji slnečného disku, prvý raz pozorovala 8. mája 1921. Na zistenie údajov o slnečnom magnetickom poli bola použitá metóda založená na Zeemanovom jave a predložený model vysvetľoval topologické zmeny poľa pomocou aproximácie slnečného magnetogramu kruhovým prstencom (torusom), ktorý podstupoval rôzne zmeny: rozseknutie, spojenie, skrútenie či zvlnenie. Autori štúdie [7] očakávali, že ďalším rozvinutím ich torusového modelu by bolo možné študovať vývoj aktívnej oblasti číslo 1842 a možno dospieť napríklad k odhadu energie, ktorá sa uvoľní počas extrémnej slnečnej búrky na základe zmeny parametrov komplexnosti torusu. Takéto ďalšie rozvinutie modelu nebolo ešte podľa našich znalostí zrealizované.

Zrážka prvej z výrazných porúch k Zemi smerujúceho slnečného vetra, ktorá veľmi pravdepodobne súvisela s existenciou a vývojom slnečných škvŕn v oblasti 1842, spôsobila 13. mája 1921 o 13:06 UT náhle zvýšenie horizontálnej zložky geomagnetického poľa, resp. horizontálnej intenzity H, (úkaz nazývaný SC; z angl. sudden commencement) o zhruba 100 nT – v nízkych magnetických šírkach bol nárast až o 127 nT, normovaná globálna hodnota bola 89 nT. Toho istého dňa o 19:24 UT nasledoval ešte jeden menej výrazný úkaz SC. V nasledujúci deň, t. j. 14. mája, došlo o 14:05 UT k tretiemu SC, pre ktorý normovaná hodnota bola 55 nT. Každý z týchto úkazov trval viac ako hodinu (prvý trval 1,5 h, druhý aj tretí 1,2 h) [8, 9]. Mohli by sme predpokladať, že kľúčovú úlohu v následnej extrémnej magnetickej búrke zohrali dva výrony koronálnej hmoty (CME; z ang. coronal mass ejection), ktoré sa prejavili ako prvé a tretie SC zo spomínaných SC. Dá sa predpokladať, že prvé CME v medziplanetárnom priestore „vyčistilo cestu“ pre druhé CME [7], ktoré potom mohlo udrieť na Zem v plnej sile a spôsobiť takú intenzívnu geomagnetickú aktivitu, aká sa pozorovala.

Táto udalosť z 13. až 15. mája 1921 je považovaná za najintenzívnejšiu magnetickej búrku 20. storočia; v niektorých parametroch je dokonca považovaná za porovnateľnú s Carringtonovou búrkou z 1. a 2. septembra 1859 [10]. Pri porovnaní májovej búrky z roku 1921 s Carringtonovou búrkou zo septembra 1859 [11] je tu aj tá podobnosť, že obidve tieto superbúrky sa vyskytli v zostupných fázach slnečného cyklu, pričom slnečné cykly boli v obidvoch prípadoch mierne a nevýrazné [7].

Tu treba podotknúť, že Carringtonova búrka sa zvykne považovať za prípad tej najextrémnejšej slnečnej búrky, aká len môže ohrozovať Zem. Tento predpoklad však vôbec nemusí byť správny, pretože na pomaly rotujúcich Slnku podobných hviezdach boli pozorované erupcie, pri ktorých bolo uvoľnené 1000-krát väčšie množstvo energie ako pri Carringtonovej erupcii [12].

Je šťastím, že v čase, keď došlo k tejto extrémnej geomagnetickej búrke, bolo na území dnešnej Slovenskej republiky v prevádzke geomagnetické observatórium Stará Ďala. V archívoch observatória sme objavili magnetogram, ktorý zachytáva priebeh časti búrky v dvoch geomagnetických elementoch – v magnetickej deklinácii a vo vertikálnej zložke (vertikálnej intenzite). Tretí nezávislý element, napríklad horizontálna intenzita, v tom čase pravdepodobne zaznamenaný nebol.

Uvedený záznam nebol v dobových zdrojoch bližšie popísaný, nebola stanovená mierka zakresleného grafu a nebolo bez bližšej expertízy zrejmé, čo je v skutočnosti na zázname zobrazené. Cieľom našej práce bolo bližšie identifikovať a popísať zachovaný materiál. V tomto príspevku prezentujeme zrekonštruovaný záznam magnetickej deklinácie a vertikálnej intenzity pre búrku z 13. až 15. mája 1921 podľa pozorovaní observatória Stará Ďala.

POJMY MAGNETICKÁ DEKLINÁCIA A VERTIKÁLNA INTENZITA

Magnetická deklinácia (značka D) je definovaná ako uhol (v horizontálnej rovine) medzi zemepisným a magnetickým severom (viď obr. 1 v práci [13]). Laickej verejnosti je magnetická deklinácia známa v najmä kvôli navigácii podľa magnetického kompasu.

Vertikálna zložka geomagnetického poľa (značka Z), nazývaná aj vertikálna intenzita, je priemet vektora geomagnetického poľa do vertikálneho smeru. Variácie vertikálnej intenzity do veľkej miery závisia od konfigurácie elektrickej vodivosti podložia. S variáciou deklinácie ΔD a variáciou horizontálnej intenzity ΔH (horizontálna intenzita H je definovaná ako priemet vektora geomagnetického poľa do horizontálnej roviny) sa variácie vertikálnej intenzity ΔZ zvyknú spájať empirickým vzťahom

$$\Delta Z = A \Delta H + B \Delta D, \quad (1)$$

v ktorom A a B sú komplexnými funkciami periódy variácie [14].

URČENIE MIEROK A REKONŠTRUKCIA ZÁZNAMOV Z 13. AŽ 15. MÁJA 1921

Cieľom tejto kapitoly je určiť škálové faktory, resp. citlivosť prístroja, ktorým bol na fotografický papier zaznamenaný chod magnetickej deklinácie vertikálnej zložky počas extrémnej búrky v máji 1921 (obr. 1). Inými slovami, bolo potrebné zistiť, akej veľkej zmene deklinácie (v uhlových minútach) a Z -ovej zložky (v nT) zodpovedá na zvislej osi zmena o jednotku dĺžky (milimeter).

Metodika použitá na určenie mierky deklinácie

Keďže v období niekoľkých rokov, počas ktorých sa vyskytla aj študovaná extrémna búrka, absolútne geomagnetické merania potrebné na stanovenie citlivosti registračnej aparatury neboli na observatóriu Stará Ďala vykonávané [15], museli sme sa v našej štúdii uspokojiť s odhadnutou hodnotou mierky. K tomuto odhadu boli použité údaje z okolitých období (pred študovanou udalosťou aj po nej), v ktorých zistenie mierky bolo možné. Pritom sme predpokladali, že za celé medziobdobie medzi úsekmi so známou mierkou sa táto mierka podstatným spôsobom nezmenila. Ako ukážeme, táto podmienka bola splnená dostatočne dobre.

Mierku sme odhadli dvomi spôsobmi:

- A) Pri prvom spôsobe sme mierky vypočítali priamo zo známych údajov pre obdobie pred študovanou udalosťou a po študovanej udalosti. Pritom sme mierku stanovili ako pomer známej variácie deklinácie v uhlových minútach a príslušnej zmene na grafickom zázname (magnetograme) v milimetroch. Časť údajov o deklinácii sme zistili z tabuľkových hodnôt v ročenkách observatória, v niektorých prípadoch boli zase hodnoty deklinácie vtedajšími pozorovateľmi vpísané priamo do magnetogramov.

B) Pri druhom spôsobe sme porovnali veľkosť dennej variácie pre deklináciu v roku 1921 v pokojných dňoch v blízkosti letného slnovratu (v uhlových minútach) s variáciou na príslušných magnetogramoch (v milimetroch). Pre úplne pokojné podmienky je takáto variácia prakticky totožná s takzvanou Sq variáciou [1]. Hodnotu pokojnej variácie v uhlových minútach sme odhadli z období okolo letného slnovratu v okolitých rokoch. Obdobia v okolí letného slnovratu boli pre tento účel zvolené preto, lebo v tom čase je Sq variácia najväčšia v roku, vďaka čomu môžeme očakávať menšie chyby v určení mierky v porovnaní s chybami v iných časťami roka (pretože v iných častiach roka by išlo o podiel menších čísel, ktorý je citlivejší na chyby vstupných údajov).

Na druhe strane, mierku pre časovú os nebolo zložité stanoviť. K dispozícii sme mali vedomosť, že dobový prístroj pracoval v režime takzvanej jednocentimetrovej registrácie, čím sa myslí, že jeden centimeter na časovej osi zodpovedá jednej hodine. Okrem toho, výskyt globálnych úkazov v geomagnetickej aktivite zaznamenaných počas búrky na magnetograme v Starej Ďale musí časovo súhlasiť s výskytom príslušných globálnych úkazov na iných observatóriách, napríklad tých, ktoré uvádza [10, 16]. Takým globálnym úkazom je napríklad náhly začiatok búrky (tzv. SSC; z angl. sudden storm commencement). To nám umožnilo zorientovať sa na časovej osi magnetogramu.

Výsledky stanovenia mierky pre záznam deklinácie na magnetograme pre máj 1921

Spôsobom označeným v predošlej podkapitole ako spôsob A sme vypočítali škálový faktor, t. j. mierku resp. citlivosť, pre obdobia pred rokom 1921 a po roku 1921. Použili sme nato ručne vybrané magnetogramy (tab. 1), pre ktoré boli splnené súčasne dve podmienky: (1) bolo v nich možné zreteľne určiť rozsah variácie na magnetogramoch v milimetroch, a (2) zároveň k nim bolo možné identifikovať príslušný rozsah variácie v uhlových minútach. Pre obdobie 1913 až 1919 (teda pred rokom 1921) sme zistili škálový faktor $1,248''/\text{mm} \pm 0,038''/\text{mm}$ a pre obdobie rokov 1927 a 1928 (čiže po roku 1921) sme vypočítali hodnotu $1,176''/\text{mm} \pm 0,017''/\text{mm}$. V celej tejto štúdii strednú hodnotu nameraných veličín stotožňujeme s mediánom a stanovená chyba merania je medián absolútnych hodnôt odchýlok (MAD). V roku 1929 už bol škálový faktor/mierka výrazne zmenený (konkrétne zistené hodnoty: $0,632''/\text{mm}$ a $0,693''/\text{mm}$). Preto sme údaje od roku 1929 nezahrnuli do našich výpočtov. Z výsledkov môžeme usúdiť, že nami vypočítané škálové faktory pred rokom 1921 a po roku 1921 sa prakticky nezmenili. Hodnota škálového faktora vypočítaná zo všetkých dát v tabuľke 1 je $1,199''/\text{mm} \pm 0,013''/\text{mm}$.

Tabuľka 1 Citlivosť (resp. mierka) pre magnetickú deklináciu určená pre vybrané dni

Dátum	Mierka ('/mm)	Dátum	Mierka ('/mm)	Dátum	Mierka ('/mm)
22.05.1913	1,248	05.10.1919	1,349	20.06.1927	1,111
06.06.1913	1,147	17.10.1919	1,349	29.06.1927	1,220
07.06.1913	1,136	22.10.1919	1,376	10.06.1928	1,176
02.06.1918	1,207	07.01.1927	1,000	14.07.1928	1,221
23.06.1918	1.308	19.06.1927	1,149	16.07.1928	1,190

Pre úplnosť treba uviesť, že pre údaje do roku 1918 je správne nazývať observatórium Stará Ďala (dnešné Hurbanovo) vtedajším historickým názvom Ógyalla.

Predpoklad, že nastavenie registračného prístroja pre záznamy deklinácie sa medzi rokmi 1913 až 1928 zásadne nezmenilo, sme overili aj iným spôsobom. Predpokladali sme, že v pokojných dňoch v čase letných slnovratov je na danom mieste rozsah pokojnej dennej variácie spôsobovanej S_q (z angl. solar quiet) prúdmi v priemere rovnaká. Preto by mala byť na magnetogramoch zakreslená krivka, ktorej výkyv v priebehu dňa má ten istý rozsah v milimetroch. Tabuľka 2 ukazuje rozsah variácií v milimetroch pre takéto pokojné dni. Pred rokom 1921 boli S_q variácie s rozsahom $8,80 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$, v roku 1921 bol rozsah $8,64 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ a po roku 1921 to bolo $8,45 \text{ mm} \pm 0,08 \text{ mm}$. Dá sa konštatovať, že prístroj mal v roku 1921 rovnaké nastavenie ako pred rokom 1921 aj ako po roku 1921. Berúc do úvahy všetky hodnoty v tabuľke 2, je S_q variácia zaznamenaná na fotografickom papieri v čase letného slnovratu $8,55 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Tabuľka 2 Variácia v milimetroch v grafických záznamoch deklinácie počas pokojných dní

Obdobie	Dátum	Variácia (mm)
Pred rokom, počas ktorého sa vyskytla študovaná búrka	22.05.1913	8,25
	06.06.1913	9,50
	07.06.1913	8,80
	05.07.1917	9,20
	19.06.1919	7,80
V roku 1921, keď sa vyskytla študovaná búrka	01.06.1921	8,72
	18.06.1921	8,35
	21.06.1921	8,30
	22.06.1921	8,78
	24.06.1921	8,64
	10.07.1921	8,51
	18.07.1921	8,74
Po roku 1921, keď sa vyskytla študovaná búrka	19.06.1927	8,70
	20.06.1927	8,10
	29.06.1927	8,20
	10.06.1928	8,50
	14.07.1928	8,60
	16.07.1928	8,40

Pokojná variácia v uhlových minútach v obdobiach pred rokom 1921 a po roku 1921 (tab. 3) je pre zvolené pokojné dni (len také dni, pre ktoré bolo možné dennú variáciu považovať za S_q variáciu) $10,3' \pm 0,1'$ a $10,0' \pm 0,0'$ (t. j. chyba určenia je menšia ako presnosť, s akou je zapísaný výsledok). Keďže opäť konštatujeme, že rozdiel je tu zanedbateľný, môžeme považovať za potvrdené, že citlivosť prístroja bola medzi rokmi 1913 a 1928 zachovaná. S_q variácia počítaná zo všetkých hodnôt v tabuľke 3 je $10,0' \pm 0,0'$.

Tabuľka 3 Variácia deklinácie v uhlových minútach počas vybraných pokojných dní

Pred rokom 1921		Po roku 1921	
Dátum	Variácia (')	Dátum	Variácia (')
13.07.1911	10,6	19.06.1927	10,0
22.05.1913	10,3	20.06.1927	9,0
06.06.1913	10,9	29.06.1927	10,0
07.06.1913	10,0	10.06.1928	10,0
18.06.1913	10,0	14.07.1928	10,5
–	–	16.07.1928	10,0

Pre výpočet škálového faktora spôsobom B sme použili rozsah S_q variácie v milimetroch aj v uhlových stupňoch z tabuliek 2 a 3. Berúc do úvahy stredné hodnoty všetkých údajov v tabuľkách, odhadnutá hodnota faktora je $1,17'/\text{mm} \pm 0,01'/\text{mm}$.

Výslednú hodnotu škálového koeficientu pre magnetickú deklináciu sme stanovili ako vážený priemer faktora získaného metódou A a hodnoty, ktorú poskytla metóda B. Pritom za váhy sme brali prevrátené hodnoty štvorcov chýb. Po zaokrúhlení na tri platné cifry takto máme koeficient $1,18'/\text{mm} \pm 0,01'/\text{mm}$.

Metodika použitá na určenie mierky vertikálnej zložky magnetického poľa

Počas dlhšieho obdobia medzi rokmi 1911 a 1941 neboli absolútne (a často ani relatívne) merania vertikálnej zložky na observatóriu Stará Ďala vykonávané [15]. Preto sme sa aj pri vertikálnej intenzite, rovnako ako v prípade deklinácie, museli uspokojiť s odhadom hodnoty pre mierku. Časovo najbližšie ku skúmanému obdobiu bola absolútna hodnota vertikálnej zložky zaznamenávaná v rokoch 1906 – 1911. Keďže ale v roku 1911 prestal byť absolútny prístroj spoľahlivý, v máji 1911 sa absolútne hodnoty úplne prestali určovať. Absolútne merania vertikálnej zložky boli obnovené až o tri desaťročia neskôr, a to v rokoch 1941 a 1942). Pretože rok 1941 je časovo vzdialený skúmanému obdobiu, vybrali sme si na porovnanie roky 1909 a 1910. Z veľkých variácií sme však zistili, že mierka použitá v záznamoch v roku 1909 bola približne do konca júna, keď bolo zaznamenávanie na niekoľko dní prerušené, iná ako potom. Pri odhadovaní sme použili teda iba záznamy a údaje z druhého polroka 1909 a z celého roka 1910.

Mierku sme odhadli nasledovným spôsobom: Na základe veľkých variácií zaznamenaných na magnetogramoch a príslušných tabuľkových hodnôt v roku 1909 a 1910 sme určili mierku v danom roku ako podiel hodnôt v ročenkách observatória v nanoteslách a príslušnej zmeny v milimetroch na nami vybraných záznamoch. Potom sme na ručne vybraných záznamoch zmerali veľkosť pokojnej variácie (S_q) v období okolo letného slnovratu v roku 1910 a júla 1909 a porovnali sme ho s tým istým javom z roku 1921. Nakoľko v rokoch 1909 a 1910 vymieňali záznamové médium (fotopapier) okolo 12:30 GMT, rozhodli sme sa pre obe obdobia (1909 – 1910 a 1921) porovnávať nárast horizontálnej zložky v milimetroch presne medzi 13:00 a 17:00 GMT. Na tomto časovom úseku je totiž pre

pokojnú dennú variáciu na danom observatóriu typickou výrazná zmena (nárast) vertikálnej zložky poľa za pomerne krátky čas, čo vedie k prijateľne malej chybe pri stanovaní hľadanej mierky.

Mierku v roku 1921 napokon odhadneme ako podiel pokojnej variácie z rokov 1909 – 1910 (v mm) a roku 1921 (v mm) vynásobený mierkou z veľkých variácií z rokov 1909 – 1910 (v nT/mm).

Mierku v období druhého polroka 1909 a v roku 1910 by sme mohli odhadovať aj ako podiel hodnôt z ročenky observatória a veľkosti pokojnej variácie. Tieto hodnoty sa ale ukázali ako veľmi nekonzistentné, preto sme túto metódu pri vertikálnej zložke nepoužili.

Výsledky stanovenia mierky pre vertikálnu zložku na magnetograme pre máj 1921

V období druhého polroka 1909 a v roku 1910 sme na základe veľkých variácií (nie Sq) zistili mierku $3,11 \text{ nT/mm} \pm 0,02 \text{ nT/mm}$. Pri jej určení sme použili 7 hodnôt z roku 1910 a 4 hodnoty z roku 1909, čo je podľa nás postačujúce, nakoľko zistené mierky si boli veľmi podobné (tab. 4), čo vyjadruje pomerne malá chyba (t. j. vyššie spomenutá hodnota $\pm 0,02 \text{ nT/mm}$).

Počas pokojnej variácie (Sq) v dňoch blízkyh letnému slnovratu v roku 1910 a júli 1909 medzi 13:00 a 17:00 GMT mal nárast horizontálnej zložky na magnetogramoch hodnotu $2,90 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ (tab. 5). Do výpočtov sme zahrnuli iba 2 hodnoty z ručne vybraných magnetogramov z júla 1909 a 7 hodnôt z roku 1910 (medzi 23. 5. a 1. 7.), nakoľko ďalšie magnetogramy z toho obdobia zaznamenávali porušené geomagnetické pole, resp. boli poškodené alebo inak nečitateľné.

Tabuľka 4 Citlivosť (resp. mierka) pre vertikálnu intenzitu, t. j. vertikálnu zložku geomagnetického poľa, určená pre vybrané dni.

Dátum	Mierka (nT/mm)
03.07.1909	3,02
21.07.1909	3,15
21.09.1909	3,11
30.09.1909	3,02
27.03.1910	3,06
31.03.1910	3,55
27.04.1910	3,12
02.05.1910	3,25
02.05.1910	3,47
22.08.1910	3,06
27.10.1910	3,07

Tabuľka 5 Nárast vertikálnej zložky na vybraných záznamoch v dátumoch z júla r. 1909 a okolo letného slnovratu r. 1910 počas magneticky pokojných dní v čase medzi 13:00 a 17:00 GMT v milimetroch.

Dátum	Nárast (mm)
16.07.1909	3,05
16.07.1909	2,90
23.05.1910	2,90
04.06.1910	3,45
06.06.1910	2,20
07.06.1910	2,70
14.06.1910	2,85
30.06.1910	3,20
01.07.1910	2,80

Rovnaký jav (Sq variáciu medzi 13:00 a 17:00 GMT) a metodiku sme si zvolili aj pre rok 1921 (tab. 6). Nárast na magnetogramoch bol pritom $5,55 \text{ mm} \pm 0,07 \text{ mm}$. Použili sme 5 ručne vybraných magnetogramov medzi 23.5. a 18.7 1921. Ďalšie z obdobia okolo letného slnovratu boli nečitateľné, nebolo z nich možné odčítať časovú os alebo variácie zachytené na nich neboli pokojné.

Na základe predošlých zistení sme mierku osi vertikálnej zložky v roku 1921 určili na $1,63 \text{ nT/mm} \pm 0,04 \text{ nT/mm}$.

Tabuľka 6 Nárast vertikálnej zložky na vybraných záznamoch v dátumoch okolo letného slnovratu r. 1921 počas magneticky pokojných dní v čase medzi 13:00 a 17:00 GMT v milimetroch.

Dátum	Nárast (mm)
23.05.1921	5,70
25.05.1921	5,00
01.06.1921	5,50
05.06.1921	5,55
18.07.1921	5,85

Zrekonštruovaný záznam z 13. až 15. mája 1921 v Starej Ďale

Výsledok rekonštrukcie záznamu deklinácie ukazujú horné krivky na jednotlivých magnetogramoch v obrázku 1. Zrekonštruovaný záznam vertikálnej zložky geomagnetického poľa je predstavený na obrázku 1 spodnými krivkami, taktiež na obidvoch magnetogramoch.

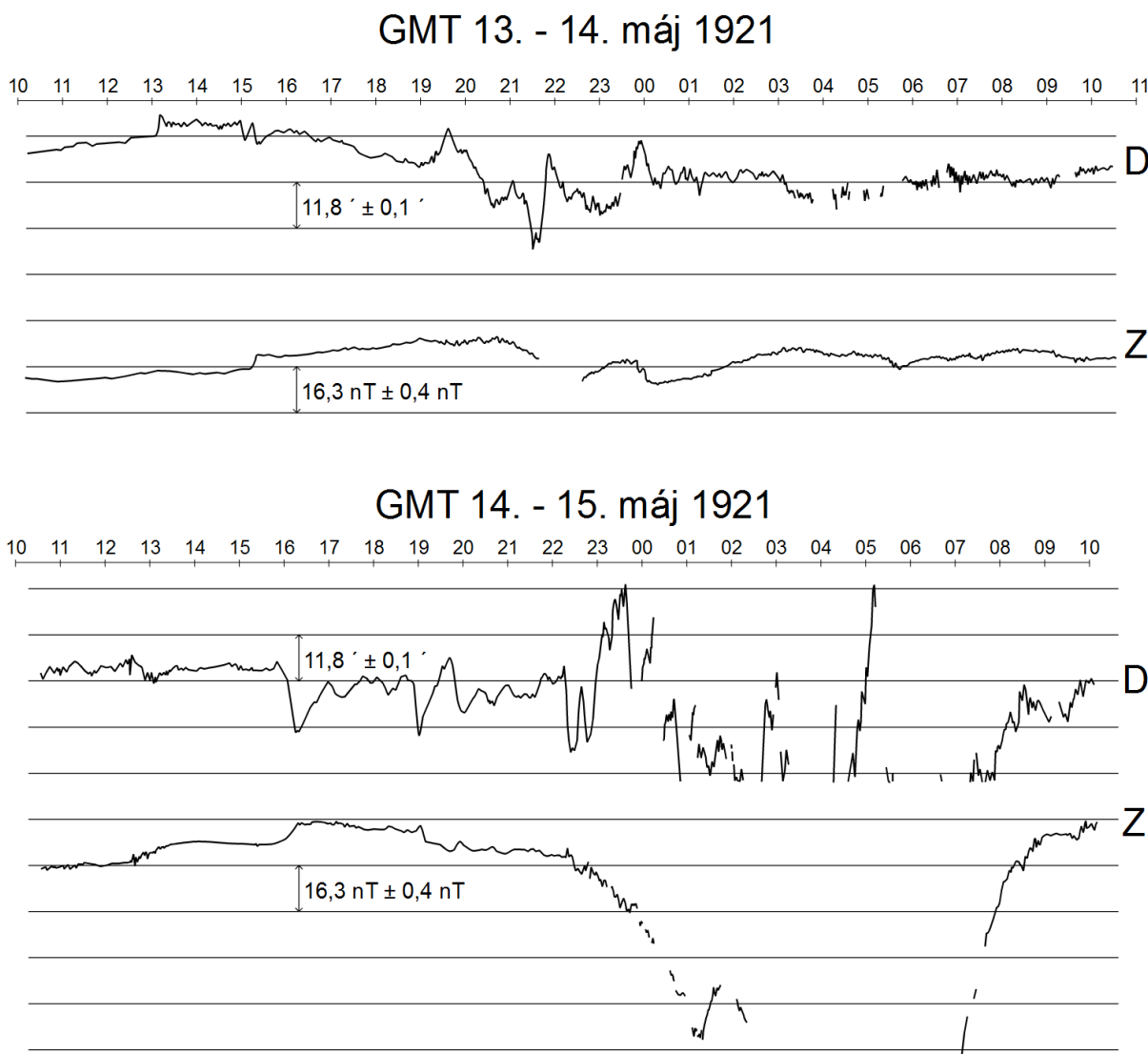
DISKUSIA A ZÁVER

Cieľom našej štúdie bolo zrekonštruovať záznam veľmi významnej magnetickej búrky, ktorý bol urobený na geomagnetickom observatóriu v Starej Ďale 13. až 15. mája 1921. K splneniu tohto cieľa bolo nutné vyriešiť niekoľko čiastkových úloh. Prvým krokom bola identifikácia geomagnetických elementov, ktoré boli na nepopísaných záznamoch zachytené. Porovnaním so staršími záznamami observatória Stará Ďala a jeho predchodcu Ógyalla, ako aj porovnaním so záznamami z iných svetových observatórií, sme zistili, že zaznamenanými geomagnetickými elementmi boli magnetická deklinácia D a vertikálna zložka geomagnetického poľa (tzv. vertikálna intenzita) Z .

Ďalším krokom bolo správne popísanie časovej osi, k čomu sme použili porovnanie morfológických vlastností globálnych geomagnetických úkazov, ktoré sme v období medzi 13. a 15. májom 1921 identifikovali v starodávskom zázname a súčasne aj na záznamoch z iných svetových observatórií.

Najnáročnejšou časťou tejto štúdie bolo stanovenie mierky pre magnetickú deklináciu a vertikálnu intenzitu, s akou boli tieto elementy vynášané na fotografický papier. Pre deklináciu sme získali hodnotu $1,18'/\text{mm} \pm 0,01'/\text{mm}$. Kvôli porovnaniu s inými publikovanými zdrojmi uvedme, že v práci [17], v ktorej bola študovaná búrka z 8. marca 1918, bola stanovená hodnota citlivosti $1,3'/\text{mm}$. V uvedenej práci bola tá hodnota stanovená na základe údajov z jediného, hoci pomerne detailne popísaného magnetogramu. Hodnota určená v tejto štúdii sa od uvedenej publikovanej hodnoty líši iba o $\sim 0,1'/\text{mm}$; pritom našu hodnotu, stanovenú z väčšieho počtu magnetogramov, považujeme za presnejšie určenú. Pre vertikálnu intenzitu sme získali mierku $1,63 \text{ nT}/\text{mm} \pm 0,04 \text{ nT}/\text{mm}$; porovnanie tejto mierky s inou publikovanou hodnotou sme neurobili, pretože podľa našich vedomostí o tejto veličine pre dané obdobie pre Starú Ďalu žiadna práca nebola doteraz publikovaná.

Dáta, ktoré sme získali v tejto štúdii umožňujú urobiť si predstavu o rýchlosti zmeny geomagnetického poľa. Najväčšia hodnota, ktorú sme zo zrekonštruovaného magnetogramu deklinácie určili, bola $7,54'/\text{min} \pm 0,63'/\text{min}$. Pri uvažovaní intenzity východnej zložky geomagnetického poľa, ktorá v roku 1921 bola v Starej Ďale -1702 nT , to znamená rýchlosť zmeny $45,7 \text{ nT}/\text{min} \pm 13,5 \text{ nT}/\text{min}$. Pre porovnanie, rýchlosť zmeny geomagnetického poľa, ktorá spôsobila kolaps elektrickej rozvodnej siete v kanadskom Quebecu, bola $479 \text{ nT}/\text{min}$ [6], teda o rád väčšia. V našom prípade však máme pre Starú Ďalu len hodnotu rýchlosti výchylky poľa vo východnom smere (smer zmeny poľa pri zmene deklinácie), a to dokonca len z časti záznamu, ktorá nezachytáva najextrémnejšiu časť búrky (vtedy totiž merací prístroj vyšiel mimo svoj merací rozsah); aj napriek tomu je to veľmi veľká hodnota.



Obrázok 1 Zrekonštruovaný záznam chodu magnetickej deklinácie a vertikálnej intenzity z observatória Stará Ďala počas extrémnej variácie geomagnetického poľa 13. až 15. mája 1921. V registračnom prístroji sa fotografický papier spravidla menil za nový v predpoludňajšom čase, preto je zvlášť zobrazený záznam (magnetogram) z prvého fotopapiera pre dni 13. a 14. máj 1921 a z druhého papiera pre 14. a 15. máj 1921. Čas uvedený v obrázku je greenwichský stredný čas. Horné krivky v záznamoch znázorňujú magnetickej deklináciu a spodné krivky vertikálnu intenzitu. V obrázku je tiež naznačená mierka pre deklináciu a pre vertikálnu intenzitu.

Pri niektorých veľmi rýchlych zmenách deklinácie pozorujeme na zrekonštruovanom magnetograme pomerne veľké výchylky. Napríklad 15. mája okolo 5. hodiny greenwichského času za dobu kratšiu ako jedna hodina bola zmena deklinácie až $51,5' \pm 4,3'$, t. j. takmer 1° ; táto zmena pokračovala ďalej mimo meracieho rozsahu prístroja. V prepočte na jednotky geomagnetického poľa táto zmena predstavovala $312,1 \text{ nT} \pm 26,0 \text{ nT}$ (pred vyjdením mimo rozsah). Na získanie predstavy o extrémnej variácii deklinácie počas tejto búrky si pomôžeme kvázilogaritmickou škálou, ktorá sa v Hurbanove (čo je neskorší názov observatória Stará Ďala) používala od roku 1951 na určovanie indexu geomagnetickej aktivity K [18]. Index K

udáva úroveň geomagnetickej aktivity pre trojhodinové časové úseky na stupnici od 0 po 9; s indexom 0 pre pokojné pole a indexom 9 pre extrémne porušené pole. Hranicou medzi K indexami 8 a 9 bola hodnota niektorej z horizontálnych zložiek 350 nT. Naša hodnota 312,1 nT je čisto len variácia deklinácie (navyše pred vyjdením mimo merací rozsah), pričom je rozumné predpokladať, že variácia horizontálnej intenzity bola takmer s istotou ešte väčšia.

Zaujímavé sú aj údaje, ktoré poskytol neúplný záznam vertikálnej intenzity (pozri obr. 1). Výrazný pokles intenzity z hodnoty o 22:20 GMT 14. mája po hodnotu o 01:22 GMT 15. mája predstavoval $62 \text{ nT} \pm 2 \text{ nT}$. Následne po krátkom náraste hodnoty intenzita opäť klesla až tak, že sa stopa lúča na fotografickom papieri stratila a prístroj sa dostal mimo merací rozsah. Stopa sa vrátila späť na fotografický papier (resp. stala sa opäť viditeľnou) o 07:09 GMT (15. mája) a intenzita prudko stúpala, až kým o 09:56 GMT (15. mája) nedosiahla na danom zázname svoje maximum; nárast predstavoval až $85 \text{ nT} \pm 2 \text{ nT}$. Je to vskutku veľká variácia. Napríklad počas extrémne prudkej variácie vertikálnej intenzity 29. októbra 2003, ktorá bola označená za búrku Carringtonovho typu [19], bol v Hurbanove (dnešný názov pre historické observatórium Stará Ďala) v čase medzi 06:00 UT a 07:00 UT rozsah variácie vertikálnej intenzity iba 56,5 nT. Pritom to bolo práve v tom v čase, keď bol pozorovaný mimoriadne prudký a hlboký pokles horizontálnej intenzity. Nasledoval ho rovnako prudký návrat takmer na pôvodnú hodnotu. Je však potrebné uviesť tiež to, že denná variácia vertikálnej intenzity (t. j. rozsah hodnôt vertikálnej intenzity za celý deň) bola 29. októbra 2003 ešte vyššia, a to 194,4 nT.

So znalosťou koeficientov A a B v rovnici (1) pre potrebné periódy vo variáciách geomagnetického poľa počas pozorovanej búrky by hypoteticky bolo možné získať aj variáciu horizontálnej intenzity, ktorá 15. mája 1921 v Starej Ďale nebola zaznamenaná. Tejto úlohe sme sa však v našej štúdií nevenovali, pretože najvýraznejšia časť búrky nebola kvôli vyjdeniu mimo merací rozsah aparatúry zaznamenaná ani v zložkách D a Z . Detailnejší obraz o prejavoch tejto extrémnej geomagnetickej búrky v oblasti strednej a východnej Európy by sa mohol dať získať preskúmaním záznamov z observatórií Mníchov, Pula a Swider, ak by takéto záznamy boli k dispozícii, o čom zatiaľ nemáme vedomosť.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied prostredníctvom grantu VEGA 2/0085/21.

LITERATÚRA:

- [1] Valach, F. *Magnetické búrky: Fyzikálne základy*. Slovenská ústredná hviezdáreň Hurbanovo 2020, ISBN 978-80-89998-11-1.
- [2] Prigancová, A., Vörös, Z. *On 100-year history of the Hurbanovo geomagnetic observatory*. Contributions to Geophysics and Geodesy, 2001, 31, 1, 11-16.
- [3] Hejda, P. *Observatories in Central and Eastern Europe*. In Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, Ed.: D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, Springer, Dordrecht, 2007, 728-729.
- [4] Linthe, H.-J. *Observatories in Germany*. In Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, Ed.: D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, Springer, Dordrecht, 2007, 729-731.
- [5] Em, A. A. *Jordströmmar såsom brandstiftare [v preklade: Zemské prúdy ako podpaľač]*. Brandskydd, 1921, 77-79, (vo švédčine).

- [6] Kappenman, J. G. *Great geomagnetic storms and extreme impulsive geomagnetic field disturbance events – An analysis of observational evidence including the great storm of May 1921*. Advances in Space Research, 2006, 38, 188-199.
- [7] Lundstedt, H., Persson, T., Andersson, V. *The extreme storm of May 1921: observations and a complex topological model*. Annales Geophysicae, 2015, 33, 109-116.
- [8] Observatori de l'Ebre. International service on rapid magnetic variations, [dostupné on-line <http://www.obsebre.es/en/rapid/>], [dňa 14. 10. 2021].
- [9] Mayaud P. N. *A hundred year series of geomagnetic data 1968-1967: Indices aa, storm sudden commencements*. IAGA Bulletin No. 33, IUGG, 1973, str. 8-9.
- [10] Love, J. J., Hayakawa, H., Cliver, E. W. *Intensity and impact of the New York Railroad superstorm of May 1921*. Space Weather, 2019, 17, 1281-1292.
- [11] Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Lakhina, G. S., Alex, S. *The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859*. Journal of Geophysical Research, 2003, vol. 108, no. A7, 1268.
- [12] Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T., Kusaba, S., Honda, S., Nogami, D., Shibata, K. *Superflares on solar-type stars*. Nature, Letter, 2012, 485, 478-481.
- [13] Valach, F., Váczyová, M., Smartfón ako kompas: presnosť určenia smeru podľa magnetického poľa. In: Zborník medzinárodnej vedeckej konferencie Univerzity J. Selyeho 2016, Súčasné aspekty vedy a vzdelávania, Ed.: Gy. Juhász, Z. Árki, P. Csiba, Vydavateľ: Univerzita J. Selyeho, Komárno, 2016, s. 98-106.
- [14] Rikitake, T., Honkura, Y. *Solid Earth Geomagnetism*. Terrapub, Tokyo, 1985.
- [15] Valach, F., Váczyová, M., Dolinský, P., Vajkai, M. *Substitution for lost one-hour means of the geomagnetic elements for the first half of the 20-th century at the Hurbanovo Geomagnetic Observatory by means of neural networks*. Contributions to Geophysics and Geodesy, 2013, 43, 2, 125-140.
- [16] Hapgood, M. *The great storm of May 1921: An exemplar of a dangerous space weather event*. Space Weather, 2019, 17, 950-975.
- [17] Valach, F. *The intense magnetic storm of March 1918 as recorded by observatory Ógyalla (present day Hurbanovo)*. Acta Geodaetica et Geophysica, 2017, 52/4, 457-465.
- [18] Ochabová, P. *Geomagnetická aktivita v Hurbanove za rok 1951-1953*. Matematicko-fyzikálny časopis, 1955, 5/1, 39-72.
- [19] Cid, C., Saiz, E., Guerrero, A., Palacios, J., Cerrato, Y. *A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century*. J Space Weather Space Clim, 2015, 5: A16, 1-6.