

Detekce výjimečných polárních září na ionosférické stanici Průhonice 10. a 11. května 2024

Zbyšek Mošna

Ústav fyziky atmosféry, Akademie věd ČR, Oddělení ionosféry a aeronomie; zbn@ufa.cas.cz

Aktivita Slunce v současném 25. slunečním cyklu je překvapivě poměrně vysoká, což se od roku 2023 projevilo mimo jiné i několika polárními zářemi pozorovanými na našem území. V noci z 10. na 11. května 2024 došlo v důsledku interakce výronu koronální hmoty se zemským magnetickým polem k pozorování výjimečné polární záře, která v řadách široké veřejnosti vzbudila velkou pozornost. Během této události jsme zaznamenali mimořádně silnou ionosférickou poruchu a zejména odrazy od postupujícího aurorálního oválu. Nejzajímavější výsledky měření na ionosférické stanici v Průhonicích z této noci představíme. Měření je doplněno o fotografie úchvatné polární záře v odpovídajících časech.

Měření ionosféry

Průhonická ionosférická observatoř byla založena v roce 1957 během Mezinárodního geofyzikálního roku (*The International Geophysical Year*). Od té doby nepřetržitě poskytuje důležité informace o stavu ionosféry. Když se řekne atmosféra, většina lidí si představí směs neutrálních molekul či atomů různých plynů. Ionosféra je však oblast zemské atmosféry zhruba nad 70 km nad zemí ve dne a nad 90 km přes noc,

která kromě neutrálních částic obsahuje i nezanedbatelnou část iontů a elektronů. Přítomnost elektricky nabitých (ionizovaných) částic významně ovlivňuje šíření elektromagnetických signálů. Ty mohou měnit svůj směr i rychlost, mohou být i kompletně odraženy. Proporční zastoupení iontů přitom nemusí být nijak vysoké. Kupříkladu poměr mezi koncentrací elektric-



Obr. 1 Polární záře zachycená poblíž obce Nečtiny v Plzeňském kraji dne 11. 5. 2024, čas 01:05. Autor: Pavel Mora

<https://ccf.fzu.cz>

ky nabitých a neutrálních částic ve výšce 300 km, tedy zhruba ve výšce, kde je jejich koncentrace nejvyšší, je méně než jedno procento a směrem k zemi tento poměr ještě výrazně klesá. Jedná se tedy o slabě ionizované plazma.

O tom, že v atmosféře existuje oblast, která je schopna vést elektrické proudy, spekoval již Johann Carl Friedrich Gauss, když hledal vysvětlení pro pozorované rychlé změny magnetického pole Země. Existence této vrstvy pak byla experimentálně potvrzena Guglielmem Marconim v roce 1901, když se mu pomocí odrazu od ionosféry podařilo přes Atlantický oceán přenést telegrafickou zprávu a odstartovat tak informační revoluci 20. století. Systematický vývoj krátkovlnných forem bezdrátové komunikace je základem moderní rádiové komunikace na dlouhé vzdálenosti.

Odraz elektromagnetických vln od ionosféry se využíval a stále využívá pro rozhlasové vysílání či mezinárodní komunitou radioamatérů, kteří jsou schopni komunikovat na transkontinentální vzdálenosti. Ionosféra byla od dvacátých let 20. století zkoumána pomocí ionosond, tedy přístrojů detekujících odraz elektromagnetických vln od ionosféry. Význam ionosféry z hlediska šíření rozhlasových vln sice v posledních desetiletích klesá, přesto je nadále intenzivně studována z důvodu jejího vlivu na změnu dráhy a rychlosti šíření signálů používaných globálními navigačními satelitními systémy (GNSS, [1]). Zpoždění signálu po průchodu ionosférou se dají velmi úspěšně korigovat různými technikami používajícími například ionosférické modelování.

K vývoji modelů pak významně přispívají právě ionosférická pozemní pozorování, zejména využití ionosond a digisonď, jejichž princip v tomto příspěvku stručně popíšeme. Rádi bychom představili velmi zajímavé pozorování aurorálního oválu pomocí digisondy DPS-4D, včetně doprovodných fotografií polárních září (obr. 1 a další). Jde totiž o kombinaci vědecky zajímavé extrémní situace kosmického počasí a atraktivní podívané, která přitahuje všeobecný zájem nejen široké veřejnosti, ale i odborníků na energetiku, rozvodné sítě, telekomunikace a další zranitelné technologie.

Jak funguje ionosonda?

Ionosonda je v nejjednodušší formě radar, který vysílá elektromagnetické signály o různých frekvencích (nejčastěji v rozmezí 1–20 MHz) směrem vzhůru. Příjemná anténa nebo anténní pole pak detekuje čas návratu signálu po odrazu v ionosféře. Plazmová frekvence je charakteristická frekvence plazmatu, se kterou elektrony v plazmatu kmitají okolo rovnovážných poloh. Při vychýlení elektronů dochází vlivem elektrických sil k jejich návratu a ke kmitání právě s (elektronovou) plazmovou frekvencí, která je závislá na elektronové koncentraci¹. Protože se tato koncentrace s výškou mění, signály o různých frekvencích se odrážejí v různých výškách. Z časového zpoždění mezi vysláním signálu vzhůru a detekcí odraženého signálu se počítá tzv. virtuální (zdánlivá) výška odrazu. To je výška vypočítaná za předpokladu, že se signál šíří rychlostí světla. Protože však skutečná rychlost šíření je kvůli přítomnosti ionosférického



Obr. 2 Vysílací anténa typu dvojitá delta na stanici Průhonice u Prahy.

plazmatu nižší, je nutné tuto skutečnost při výpočtu skutečných výšek odrazu zohlednit. Výsledkem měření je ionogram, graf závislosti virtuální výšky odrazu na vysílané frekvenci.

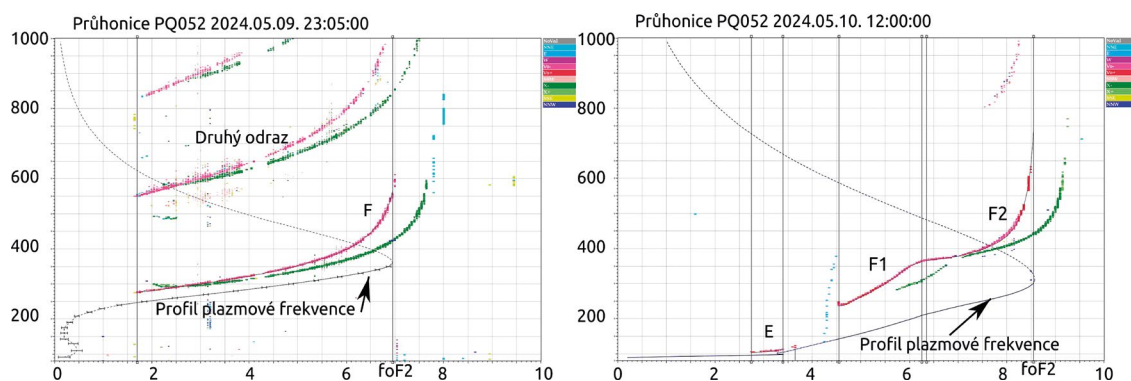
Na ionogramu jsou vidět různé ionosférické vrstvy. Při nejnižších použitých frekvencích se signál odráží od nižších vrstev (s nižší elektronovou koncentrací). Jak se frekvence zvyšuje, signál proniká dále a odráží se od vyšších, silněji ionizovaných oblastí. Nakonec dosáhne frekvence, při které projde všemi ionosférickými vrstvami a není odražen. Na obr. 2 je vysílací anténa moderního typu ionosondy, konkrétně digisondy DPS-4D, instalované v roce 2004 a modernizované v roce 2010 [2]. Průhonická ionosférická observatoř je výjimečná i tím, že její gestoři vždy dbali o personální kontinuitu a vědeckou výchovu dalších generací. Vedoucím observatoře Průhonice byl do roku 2015 Josef Boška, CSc., aktuálním vedoucím je od roku 2016 vědecký pracovník Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR Mgr. Daniel Kouba, Ph.D., který je mezinárodně uznávaným odborníkem na analýzu pohybu ionosférického plazmatu.

Ionosférické zvrstvení a ionogramy

V závislosti na denní době a sezoně je možné rozlišit různé ionosférické vrstvy. Jako historicky první byla objevena tzv. vrstva E (ze slova *electrified*), oblast nad touto vrstvou se nazývá F (ta se někdy dělí na F1 a F2). Pod vrstvou E je vrstva D a pod ní pak někdy dochází k formování málo prozkoumané vrstvy C. Každá z těchto vrstev vykazuje poněkud odlišné chování vzhledem k rozdílnému chemickému složení (molekulární plyny ve vrstvách D, E, F1 vs. atomární plyny ve vrstvách F, případně F2) i vlivem různé intenzity ionizujícího záření v dané vrstvě. Zatímco vrstva C vzniká vlivem kosmického záření, vrstva D je generována zejména zářením Lyman alfa a rentgenovým zářením, vyšší vrstvy vznikají ionizací fotony s frekvencí spadající do extrémní ultrafialové oblasti a měkkého rentgenového záření. Množství nabitých částic

» Při průniku nabitých částic do atmosféry dochází ke srážkám a k excitaci, ale i k ionizaci přítomných plynů. Při následném přechodu elektronů do nižšího energetického stavu se uvolňuje energie ve formě světla, které můžeme vidět právě jako polární záři, tedy auroru. «

¹ Ionosférické plazma je kvazineutrální. To znamená, že koncentrace elektronů je v dostatečně velkém, tedy makroskopickém objemu přibližně stejná jako koncentrace kladných iontů.



Obr. 3 Dvě ukázky klidných ionogramů: vlevo noční a vpravo denní ionogram z května 2024, v časech před geomagnetickou bouří. Maximální plazmová frekvence (MHz) vrstvy F se nazývá kritická frekvence a značí se f_oF_2 a obvykle je to i nejvyšší plazmová frekvence v celé ionosféře. Odražený signál se může odrazit od země a poté znovu od ionosféry – tak vzniká druhý nebo i třetí odraz (vlevo) s dvojnásobnou nebo trojnásobnou zdánlivou výškou (km). Na ionogramu je znázorněn profil plazmové frekvence, který se následně jednoduše přepočítá na profil elektronové koncentrace, rozdíl je pouze v měřítku použité osy.

ve vrstvách D, E a F1 se po západu slunce vlivem rychlé rekombinace rapidně snižuje, protože chybí ionizující sluneční záření. Ionty ve vrstvě F2 rekombinují mnohem pomaleji a vrstva F2 tak přetrvává i během noci, takže se denní a noční ionosféra navzájem výrazně liší. Ionosféra mění své vlastnosti s ročním obdobím, ale je velmi citlivá i na změny magnetického pole i na poruchy ve slunečním větru a další projevy tzv. kosmického počasí.

Kromě sluneční a geomagnetické aktivity ionosféru ovlivňuje i neutrální atmosféra (například přechody silných atmosférických front), zemětřesení, výbuchy sopek a další extrémní události. Kromě přírodních jevů je v ionosféře možné pozorovat i projevy lidské činnosti, například výbuchy nebo jevy spojené se změnou klimatu. Proto se charakter ionogramů mění v průběhu roku, slunečního cyklu a velmi výrazně vlivem probíhajících geomagnetických bouří.

Pro první seznámení s ionogramy jsme proto vybrali denní a noční ionogramy (obr. 3) naměřené za geomagneticky klidné situace několik hodin před dále popisovanou geomagnetickou bouří. Na ionogramech je frekvence uvedena v MHz a výška v km. Během noci je zřetelný odraz od vrstvy F (levý panel obr. 3). Červená a zelená stopa na ionogramu odlišují řádný a mimořádný mód odrazu. Vyslaná vlna se totiž v ionosférickém plazmatu (podobně jako světlo po průchodu krystalem islandského vápence) rozštěpí na dva módy, které je možné díky konstrukci přijímacích antén od sebe odlišit. Vzhledem k tomu, že se signál v ionosférickém plazmatu šíří menší rychlostí než ve vakuu, je nutné pomocí inverzních metod virtuální výšku přepočítat na skutečnou a odvodit tak skutečný profil elektronové koncentrace. Ten je pak využíván v dalších analýzách. Zajímá nás například hodnota maxima elektronové koncentrace i jeho výška, tvar profilu atd. Vpravo na obr. 3 je pak ukázka typického denního ionogramu, kde pozorujeme vrstvu E a oblast F vrstvy rozdělenou na vrstvu F1 a F2. V obou případech jde o ionogramy s odrazy, které lze dobře identifikovat a následně společně analyzovat.

Za klidných podmínek, kdy je ionosféra zvrstvena planárně, tedy se pro odraz signálu chová jako rovinné zrcadlo, vidíme na ionogramu pouze vertikální odrazy (na ionogramu červený řádný a zelený mimořádný mód). Pokud ale ionosféra obsahuje lokální nehomogeneity nebo je deformována například vlivem procházejících atmosférických vln (vlnami v neutrální atmosféře

a jejich projevy v ionosférickém plazmatu, tedy tzv. putujícími ionosférickými poruchami), dochází k odrazu od zvlněné plochy a jsme schopni detekovat i signály odražené z oblastí mimo vertikální směr. Také můžeme určit jeden ze šesti sektorů, odkud signál přichází. Směr příchodu signálu je umožněn analýzou fázového posunu signálu detekovaného na jednotlivých přijímacích anténách. Přijímací pole digisondu DPS-4D se totiž skládá ze čtyř zkřížených smyčkových antén – tři jsou umístěny ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku ve vzdálenostech 60 m a čtvrtá anténa je umístěna v těžišti trojúhelníku. Jedna strana trojúhelníku je orientována paralelně s horizontální složkou magnetického pole, tedy podél magnetického poledníku. V pravé horní části ionogramu je pak přiřazena barva danému směru. Například signály přicházející ze severovýchodu či severozápadu mají světle a tmavě modrou barvu, jihovýchodní směr má barvu žlutou.

Bouře a polární záře

Ionosféra ve skutečnosti není nikdy zcela klidná. Slunce neustále vysílá proud elektricky nabitých částic, zejména elektronů, protonů a alfa částic, který se nazývá sluneční vítr. Když tyto částice dorazí k Zemi, setkají se se zemskou magnetosférou, která většinu slunečního větru odklání. Nabité částice přítomné v magnetosféře však mohou zejména díky přepojování magnetického pole na noční straně Země proniknout až do atmosféry a narážet do atmosférických atomů a molekul. Děje se tak v oblastech tzv. *aurorálního oválu*. Vzhledem k neustálé interakci slunečního větru s magnetosférou je polární záře v polárních oblastech běžným jevem. Aurorální ovál, tedy oblast polárních září, se vyskytuje na obou polokoulích, jeho střed je posunut podél magnetického meridiánu asi o 5 stupňů směrem na noční stranu a jeho přesný tvar a poloha jsou ovlivněny geomagnetickou aktivitou. V případě tzv. geomagnetických bouří, tedy výrazných změn zemského magnetického pole, mohou nabitě částice pronikat do atmosféry i v nižších zeměpisných šířkách, aurorální ovál se rozjasňuje a posouvá směrem k rovníku do oblastí nižších zeměpisných šířek, což za příznivých podmínek umožňuje pozorovat polární záře i u nás.

Při průniku nabitých částic do atmosféry dochází ke srážkám a k excitaci, ale i k ionizaci přítomných plynů. Při následném přechodu elektronů do nižšího energetického stavu se uvolňuje energie ve formě světla, které můžeme vidět právě jako polární záři, tedy auroru

(Auróra byla římská bohyně úsvitu). Nejčastější barvy zelená a červená vznikají následkem excitace a následné deexcitace atomárního kyslíku. Zelená aurora má vlnovou délku 557,7 nm (singlet 1S) a vzniká ve výškách cca 120–400 km, poločas života je velmi krátký – okolo 1 s. Červená barva s vlnovou délkou 630 nm se vyskytuje ve velmi řídké atmosféře nad 300 km, protože v nižších výškách je poločas života kyslíkového atomu ve stavu 1D příliš dlouhý – okolo dvou minut – a většinou ještě před vyzářením dojde ke srážce s dalšími přítomnými částicemi. Další typická barva aurory je fialová s vlnovou délkou 427,8 nm a vzniká následkem ionizace molekulárního dusíku (podrobnosti například [3]). Při ionizaci dochází ke zvýšení elektronové a iontové koncentrace. Na ionogramu tedy můžeme zachytit mimořádnou přítomnost plazmatu, odlišnou od normálního zvrstvení, které se formuje za klidné situace. V tomto článku se podíváme na ionogramy zachycené v průběhu extrémní situace geomagnetické bouře. V současné době se blížíme maximu 25. slunečního cyklu a oproti některým predikcím tohoto cyklu vykazuje Slunce poměrně vysokou aktivitu.

V poslední době došlo k několika poruchám geomagnetického pole Země doprovázeným polárními zářemi, pozorovanými na našem území i jižněji. Pozorování polárních září byla hlášena např. z oblastí Arménie pod 40° s. š. Zajímavé byly například polární záře pozorované v březnu, dubnu, září a listopadu 2023.

V levé části obr. 4 je vidět ionogram z 23. března 2023 ze sondy umístěné na severu Německa v Juliusruhu. Jde o digisondu DPS-4D s kvalitní vysílací anténou, která poskytuje nepřetržitou řadu dat a (podobně jako průhonická ionosonda) navazuje na dlouhou tradici měření. Juliusruh je etalon kvality pozemního sondování jak z historického hlediska (stanice funguje od roku 1954), tak i v současnosti. Protože se Juliusruh nachází severněji než Průhonice, je pozorování efektů geomagnetických bouří častější a výsledky z této stanice uvádíme pro porovnání s našimi výsledky ze stanice Průhonice. Jak ve vrstvě F, tak ve vrstvě E jsou vidět šikmé odrazy od severu, které pocházejí z oblastí zvýšené ionizace způsobené průnikem nabitých částic do zemské atmosféry. Pomocí digisondy je tak možné například určit výšku polární záře a při nepříznivých meteorologických podmínkách i vůbec její přítomnost. Na pravém panelu obr. 4 je záznam z kamery v Juliusruhu a na pravé části fotografie je vidět vysílací anténa digisondy.

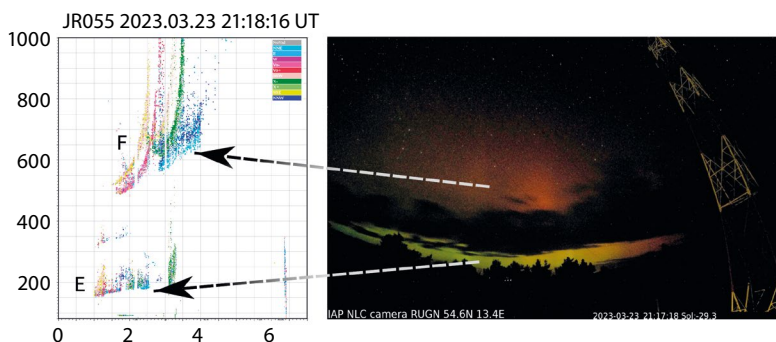
Polární záře 10.–11. května 2024

Polární záře, která letos vzbudila největší pozornost nejen vědců a „lovců polární záře“, ale i široké veřejnosti, nastala v noci z 10. na 11. května 2024. Na začátku května totiž došlo k několika výronům sluneční koronální

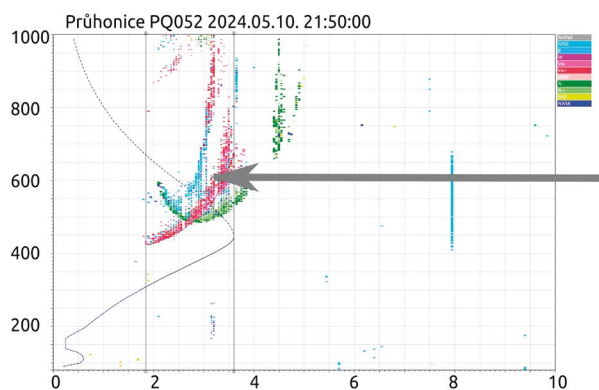
hmoty (Coronal Mass Ejection – CME), které doputovaly k Zemi právě 10. května a způsobily magnetickou bouři. Naplnila se tak předpověď, že bude možné pozorovat mimořádně silné polární záře i v České republice. Geomagnetický planetární index pro střední šířky Kp překonal k večeru hodnotu 8 na devítibodové stupnici a v průběhu noci dosáhl maximální hodnoty 9. Hodnoty indexu magnetické aktivity Dst (*Disturbance Storm Time index*) měřeného na stanicích v blízkosti geomagnetického rovníku byly také mimořádné (stručný popis Kp, Dst i dalších geomagnetických indexů je na stránce [4]). Index Dst začal výrazně klesat okolo 20. hodiny SELČ, před půlnocí dosáhl hodnoty -318 nT a po krátkém zvýšení opět začal klesat a 11. května zhruba v 5 hodin SELČ dosáhl celkově extrémní hodnoty -412 nT. Podobně jako *Halloween Solar Storm*, tedy Halloweenská sluneční bouře v roce 2003, která vrcholila těsně před svátkem Halloween, dostala i květnová událost velmi brzy svůj název *Mother's Day Storm* podle blízkého se Dne matek.

Podle Dst indexu je možné u geomagnetické bouře stanovit její závažnost – čím nižší hodnota, tím větší bouře. Hodnota Dst indexu do -50 nT znamená mírnou bouři, do -100 nT střední bouři, do -250 nT intenzivní bouři a pokles pod -250 nT je označován jako superbouře. Nejsilnější zaznamenaná superbouře v moderní historii nastala během známé Carringtonovy události v září 1859, kdy došlo k výronu koronální hmoty a následnému rozsvícení polárních září po celém světě [5, 6]. Index Dst se měří až od roku 1957, ale odhad pro tuto událost je okolo -1000 nT, některé zdroje uvádějí i hodnotu až -1760 nT. Od té doby došlo k několika dalším superbouřím, konkrétně v roce 1921 a pravděpodobně i v roce 1909, v roce 1989 a v nedávné době i v roce 2003. Hodnota Dst -500 nT ze statistického hlediska zhruba odpovídá padesátileté bouři [7]. Bouře v březnu 1989 (Dst -589 nT) byla nejsilnější událostí od počátku měření indexu Dst. Vzhledem k potenciálnímu dopadu na technologické systémy jsou geomagnetické bouře předmětem intenzivního výzkumu. Právě v roce 1989 v Kanadě a severovýchodní oblasti USA došlo k výpadku elektrických rozvodných zařízení vlivem proudů indukovaných při změně geomagnetického pole a následně byly miliony obyvatel po dobu devíti hodin bez elektrické energie. V tomto porovnání je superbouře z května 2024 skutečně mimořádná – je totiž od počátku 60. let dvacátého století na třetím místě, velmi těsně za superbouřemi z listopadu 2003 (Dst -422 nT) [8]. Tehdy došlo například k poškození japonského komunikačního satelitu ADEOS-2. Pokud bychom brali jako výchozí bod rok 1957, tak by se květnová bouře podle Dst zařadila až na šesté místo, protože v letech 1957, 1958 i 1959 došlo k bouřím s indexem Dst sice velmi podobným, ale přeci jen událost

» Ionosférická stanice Průhonice se řadí ke světově špičkovým ionosférickým observatořím. Pozemní pozorování pomocí Digisond je pro výzkum ionosféry zcela zásadní, protože poskytuje detailní fyzikální popis chování ionosféry v jejích jednotlivých oblastech. «



Obr. 4 Ionogram ze stanice Juliusruh (vlevo) s vyznačenými vrstvami E a F. Odrazy ze severního směru jsou znázorněny světle a tmavě modře. Vpravo je záběr polární záře v odpovídajícím čase z kamery, která zachycuje i vysílací anténu digisondy. Šipky propojují optické pozorování s odpovídající ionosférickou oblastí, takže je možné určit virtuální výšku polárních září v jednotlivých regionech.



Obr. 5 Jeden z prvních projevů polární záře dne 10. 5. 2024. Vlevo je na ionogramu vidět šikmý odraz z aurorálního oválu v regionu F (modrá barva indikuje převážně severní směr) v 21:50 SEČ, vpravo je optické pozorování ze stejného času směrem na sever. Foto: Pavel Mora, Nečtiny

roku 2003 těsně předčily. Velmi pozoruhodná shoda je to, že všechny bouře na druhé až šesté pozici se vešly do intervalu -429 nT až -412 nT (rozmezí pouhých 2 %). Mimořádnost události před Dnem matek z roku 2024 to však nesnižuje. Pokud se budeme ptát, jak pravděpodobná je událost podobná té Carringtonově, dostaneme různé odpovědi. Je sice možné odhadnout statistickou distribuci slunečních a geomagnetických událostí, ale použité modely jsou zatíženy celou řadou nejistot. Při velkých poruchách totiž pravděpodobně dochází k saturaci magnetosféry. Podrobnosti je možné najít například v článku autorů [9] a v uvedených referencích. Odhady pravděpodobnosti nové carringtonovské události se podle různých autorů pohybují zhruba mezi jedním a deseti procenty na desetiletí. Otázkou podle všeho není, zda taková událost vůbec nastane, ale kdy nastane. Rozhodně je velmi důležité, abychom na ni jako civilizace závislá na celé řadě technologií byli připraveni.

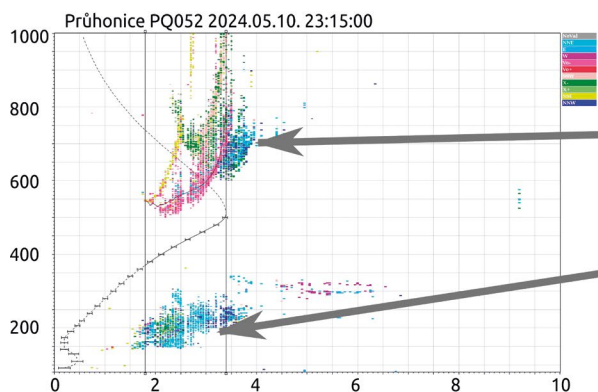
Květnová porucha ionosféry byla naštěstí přiměřená – ani příliš silná, ani příliš slabá. První pouhým okem pozorovatelné polární záře se objevily před 22. hodinou SELČ a toto přímé pozorování bylo potvrzeno i detekcí šikmých odrazů ze severu v oblasti vrstvy F (obr. 5). Odraz od aurory je na tomto a dalších ionogramech znázorněn šedou šipkou – ta ukazuje na odpovídající ionosférickou vrstvu detekovanou na ionogramu.

Intenzita pozorovaných polárních září vrcholila před půlnocí (obr. 6). Na ionogramech se objevují odrazy z aurory v oblasti F (skutečná výška nad 400 km), ale i níže (nad ~ 150 km). Na ionogramu je znázorněn profil elektronové koncentrace, ale ten je vypočítán automa-

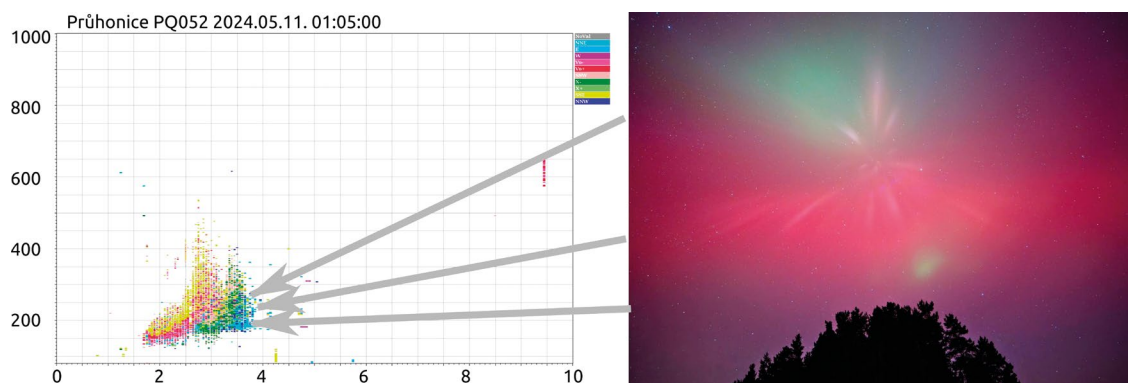
ticky a pravděpodobně s velkou chybou, takže je nutná další analýza. Poté nastalo přechodné zklidnění situace a mohlo se zdát, že tato krásná podívaná skončila.

Po půlnoci však došlo k dalšímu, ještě intenzivnějšímu projevu polární záře. Na ionogramech je tato silná polární záře vidět nejen jako šikmé odrazy ze severu, ale jsou zde zachyceny i vertikální odrazy a dokonce i odrazy z jihozápadu a jihovýchodu (obr. 7 vlevo). To tedy dokazuje, že aurora pokrývala celé území ČR a zasahovala i jižněji. Kvůli přítomnosti silné aurorální částicové vrstvy není možné pozorovat výše ležící vrstvu F – ta je kvůli silné ionizaci v nižší ionosféře kompletně odstíněna. Pozorování svědků barevné polární záře odpovídá tomu, co jsme viděli na digisondě – aurora se rozzářila na celé obloze a byla mimořádně vidět i při pohledu na jih a další směry (obr. 7 vpravo). V tu dobu bylo území České republiky přímo pod aurorálním oválem a sen všech obdivovatelů aurory se konečně vyplnil.

Profil elektronové koncentrace je možné počítat pomocí standardních inverzních metod, které dobře fungují za normálních podmínek, ale v situacích, jako byla například tato silná ionosférická bouře, automatické metody po dobu několika hodin až dnů selhávají, a proto je nutné použít komplexnější analýzu pro popis situace. Vzhledem k mimořádnosti bouře Dne matek se připravuje řada vědeckých článků zkoumajících celou škálu interakcí od Slunce k Zemi a napříč zemskou atmosférou. Právě studium mimořádných situací je z hlediska chápání vazeb mezi blízkým kosmickým prostorem a atmosférou Země velmi důležité. Ionosférická stanice Průhonice má velmi kvalitní anténní pole a řadí se tak ke světově špičkovým ionosférickým



Obr. 6 Odrazy ve výškách nad ~ 150 km a v regionu F, modrá barva indikuje směr ze severu (levý panel). Vpravo fotografie k času 23:16 SEČ, pohled na sever. Foto: Pavel Mora, Nečtiny



Obr. 7 Vrchol druhé (silnější) fáze ionosférické poruchy. Na ionogramu (levý panel) jsou vidět různé směry odrazu ve výškách nad ~130 km, nejen severní/severovýchodní/severozápadní, ale i jihozápadní a jihovýchodní a je přítomný i vertikální odraz. Ionosféra je extrémně porušena. Je kompletně odstíněna vrstva F a přímé stanovení profilu elektronové koncentrace je zde prakticky nemožné, takže na ionogramu chybí. Vpravo polární záře v čase 01:04 SELČ, pohled směrem na jihozápad, aurora je vidět všemi směry i nad hlavou. Foto: Pavel Mora, Nečtiny

observatořím. Tím tak přispívá k dodávání důležitých dat do mezinárodních databází a spolu se sousedními sondami v Německu, Belgii a Maďarsku k pokrytí střeoevropského prostoru. Pozemní pozorování pomocí digisond je pro výzkum ionosféry zcela zásadní, protože na rozdíl od integrálních metod stanovujících celkový elektronový obsah (*Total Electron Content*, TEC), poskytují digisondy detailní popis chování ionosféry v jejích jednotlivých oblastech a tím umožňují detailně studovat fyzikální mechanismy, které ionosférickou dynamiku ovlivňují.

Nezbývá než doufat, že se ve středních šířkách ještě v současném rozbouraném 25. slunečním cyklu podobně krásných polárních září dočkáme, ale že se nám superbouře konkurující té Carringtonově ještě nějakou dobu vyhne.

Článek vychází při příležitosti oslav 60. výročí založení Ústavu fyziky atmosféry AV ČR [10].

Archivní data i aktuální měření digisondou DPS-4D je možné zhlédnout na stránce [2]. Zájemce o ionosférické měření také srdečně zveme na exkurzi na stanici Průhonice – stačí kontaktovat autora ZM nebo vedoucího observatoře DK pomocí e-mailu, který je uveden na webových stránkách ÚFA AV ČR.

Poděkování

V první řadě děkuji kolegům, vědeckým pracovníkům ÚFA AV ČR RNDr. Kateřině Podolské, Ph.D., RNDr. Petře Koucké Knížové, Ph.D., a Mgr. Danielu Koubovi, Ph.D., za konzultace, cenné rady, připomínky a velkou pomoc při přípravě článku. Velmi děkuji panu Pavlu Morovi za laskavé poskytnutí krásných fotografií polárních září [11], bez kterých by se tento článek neobešel. Poděkování patří i vedoucímu observatoře Juliusruh Dr. Jensu Mielichovi za poskytnutí dat ze stanice Juliusruh.

Odkazy

- [1] Z. Mošna: Na počátku byl hrášek. Vznik a fungování GPS. *Vesmír* **97**, 574 (2018). Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2018/cislo-10/na-pocatku-byl-hrasek.html>
- [2] Data z měřicí stanice Průhonice: digisonda.ufa.cas.cz
- [3] Aurora tutorial: <https://www.swpc.noaa.gov/content/aurora-tutorial>
- [4] National Centers for Environmental Information. Přehled geomagnetických indexů a odkazy na databáze. Dostupné z: <https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetic-indices>

- [5] R. C. Carrington: Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **20** (1), 13–15 (1859). Dostupné z: <https://articles.adsabs.harvard.edu/full/seri/MNRAS/0020/0000013.000.html>
- [6] S. I. Akasofu, Y. Kamide: Comment on „The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859“ by B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, G. S. Lakhina, and S. Alex. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **110**, A9 (2005). Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JA009504>
- [7] E. W. Cliver, W. F. Dietrich: The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate* **3**, A31 (2013). Dostupné z: https://www.swsc-journal.org/articles/swsc/full_html/2013/01/swsc130015/swsc130015.html
- [8] X. Meng, B. T. Tsurutani, A. J. Mannucci: The solar and interplanetary causes of superstorms (minimum Dst ≤ −250 nT) during the space age. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **124**, 3926–3948 (2019). Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018JA026425>
- [9] D. Moriña, I. Serra, P. Puig et al.: Probability estimation of a Carrington-like geomagnetic storm. *Scientific reports* **9**(1), 1–9 (2019). Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38918-8>
- [10] Stránky ÚFA AV ČR. Dostupné z: <https://www.ufa.cas.cz>
- [11] Pavel Mora – instagramový účet @pavel_mora_photography

