

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

**Astronomické jevy a jejich vliv na dopravní a
energetickou infrastrukturu**

Daniel Legner

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Daniel Legner
Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích
Obor: Silniční a městská automobilová doprava
Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Vondrášek, Ph.D.
Garantující pracoviště: Katedra elektrotechniky a automatizace
Jazyk práce: Čeština

Název práce: **Astronomické jevy a jejich vliv na dopravní a energetickou infrastrukturu**

Název anglicky: **Astronomical phenomena and their impact on a transport and energy infrastructure**

Cíle práce: Popsání nejvýznamnějších astronomických jevů s elektromagnetickými účinky a jejich původu. Analýza možných následků na elektrická zařízení (energetická, sdělovací, bezpečnostní) podle případných historických zkušeností.

Metodika: Provedení analýzy astronomických jevů s elektromagnetickými účinky. Popsání možných rizikových následků příslušných astronomických jevů s případnými historickými zkušenostmi. Analyzování vybraných preventivních opatření k omezení rizikových následků astronomických vlivů na dopravní a energetická zařízení.

Doporučený rozsah práce: 30 - 45 s.

Klíčová slova: kosmické záření, geomagnetická bouře, sluneční erupce

Doporučené zdroje informací:

1. Asimov, I./ Explodierende Sonnen : die Geheimnisse der Supernova ; aus dem Amerikanischen und mit einem Schlusskapitel von Hermann-Michael Hahn ; Köln : Kiepenheuer & Witsch, 1989 (něm.)
2. Avdibegovič, A./ Sluneční erupce z 28. 10. 2003. Praha: MFF, 2007
3. Bumba, V., Kleczek, J. / Problemy solnečnoj aktivnosti ; Moskva : Mir, 1979 . 267 s. (rus)

4. Dvořák, J., Křivský, L./ Slunce náš život ; Praha : Panorama, 1989 . 335 s. . ISBN 80-7038-032-2
5. Karlický, M. / Mohou na Slunci vzniknout supererupce?: Can Supereruptions Take Place on the Sun?. In: Pokroky matematiky, fyziky a astronomie , Roč. 59, č. 3 (2014), s. 187-193, ISSN: 0032-2423
6. Link, F. / Změny klimatu a sluneční činnosti v posledních čtyřech tisíciletích ; Praha : ČSAV, 1956 . 51 s.
7. Vitinskij, J., I. / Morfologija solnečnoj aktivnosti ; Leningrad : Nauka, 1966 . 198 s. (rus)

Předběžný termín 2023/2024 LS - TF
obhajoby:

Elektronicky schváleno: 8. 3. 2022
doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno: 25. 3. 2022
doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.
Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci, která nese název "Astronomické jevy a jejich vliv na dopravní a energetickou infrastrukturu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Zbyňka Vondráška, Ph.D., s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor této bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. 3. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou věnoval poděkování Ing. Zbyňkovi Vondráškovi, Ph.D. za jeho rady a podporu při psaní této bakalářské práce.

Astronomické jevy a jejich vliv na dopravní a energetickou infrastrukturu

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou astronomických jevů. Obsahuje podrobné charakteristiky Slunce a planety Země a její součástí je také popis jednotlivých slunečních aktivit, které představují možné ohrožení energetické a dopravní infrastruktury na planetě Zemi. Dále jsou zde rozebrány jednotlivé historické události spojené s geomagnetickými bouřemi. Následná analýza se zabývá možnými následky pro energetická zařízení a dopravní infrastrukturu, s možnostmi jejich ochrany a výslednými ekonomickými dopady.

Klíčová slova: Slunce; kosmické počasí; sluneční erupce; sluneční vítr; výron koronální hmoty; magnetické pole; geomagnetická bouře; geomagneticky indukované proudy

Astronomical phenomena and their impact on a transport and energy infrastructure

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of astronomical phenomena. It includes detailed characteristics of the Sun and the planet Earth. And it also describes various solar activities that pose potential threats to the energy and transportation infrastructure on Earth. Furthermore, historical events related to geomagnetic storms are analyzed. The subsequent analysis focuses on potential consequences for energy facilities and transportation infrastructure, with options for their protection and resulting economic impacts.

Keywords: Sun; space weather; solar eruption; solar wind; coronal mass ejection; magnetic field; geomagnetic storm; geomagnetically induced currents

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cíl a metodika práce	12
2.1 Cíl práce	12
2.2 Metodika	12
3 Astronomické jevy a Slunce z hlediska fyziky	12
3.1 Definice astronomických jevů.....	12
3.2 Slunce.....	13
3.2.1 Hertzsprung-Russelův diagram.....	13
3.3 Vrstvy Slunce	14
3.4 Sluneční cykly	15
3.4.1 Haleův cyklus	15
3.4.2 Gleisebergův cyklus.....	16
3.4.3 Ostatní cykly	16
3.5 Magnetické Slunce	16
3.5.1 Sluneční skvrny.....	16
3.5.2 Fakule.....	17
4 Planeta Země	17
4.1 Parametry Země	18
4.2 Zemské vrstvy	18
4.3 Vzdušný obal.....	18
4.4 Magnetická Země.....	20
4.4.1 Přepólování	21
5 Kosmické počasí	21
5.1 Sledování kosmického počasí	22
5.1.1 Krátkodobé předpovědi.....	22
5.1.2 Dlouhodobé předpovědi.....	22
5.2 Sluneční vítr	22
5.3 Geomagnetická bouře.....	24
6 Hrozby pro elektronická zařízení	24
6.1 Elektromagnetická indukce	24
6.1.1 Vlastní indukčnost	25
6.1.2 Magnetická indukce	25
6.2 Vliv na rozvodné sítě	25
6.2.1 Transformátory	26
6.3 Vliv na mikroelektroniku	27

6.4	Globální polohový systém.....	27
6.5	Informační a telekomunikační technologie.....	27
6.6	Vliv na satelity	28
6.7	Jaderné elektrárny	28
6.7.1	Zabezpečení jaderné elektrárny Temelín.....	29
7	Vliv na dopravu	29
8	Historie slunečních bouří.....	30
8.1	Carringtonova událost	30
8.2	Květen 1921	31
8.3	Leden 1938.....	31
8.4	Březen 1989	31
8.5	Říjen 2003	32
8.6	Září 2017	32
8.7	Únor 2022.....	32
8.8	Koronální ejekce	33
9	Možné způsoby ochrany	33
9.1	Systémy včasného varování	33
9.2	Ochrana proti elektromagnetickému impulsu	34
9.2.1	Faradayova klec	34
9.2.2	Stínění	34
10	Vliv na zdraví osob.....	34
10.1	Rizika pro kosmonauty	35
10.2	Bezpečnost v letecké dopravě	35
11	Analýza nákladů a výdajů spojených se slunečními bouřemi.....	36
11.1	Ekonomické dopady dle studií	36
12	Závěr.....	38
13	Seznam použitých zdrojů	39

Seznam obrázků

Obrázek 1 Znárodnění slunečních vrstev v průřezu.....	14
Obrázek 2 Detailní ukázka sluneční skvrny	17
Obrázek 3 Jednotlivé vrstvy zemské atmosféry	19
Obrázek 4 Pohyb magnetického pólu	21
Obrázek 5 Sluneční vítr narážející na magnetosféru Země	23
Obrázek 6 Zničený transformátor v elektrárně Salem (New Jersey) při geomagnetické bouři v roce 1989	26
Obrázek 7 Kresba R. Carringtona, která ukazuje polohu bílé erupce při jeho pozorování .	31

1 Úvod

Abychom mohli pochopit, jak takovéto astronomické jevy vznikají, probíhají a jaké mohou mít následky, je nutné podrobněji popsat, co je to Slunce, Sluneční soustava a sluneční cykly, jelikož většina jevů je s těmito úkazy spojená. Dále v této práci popisuji pohled na tuto problematiku z hlediska fyziky a elektrotechniky. V práci je zároveň zdokumentována podrobná historie těchto událostí, jejich přímých vlivů na energetickou a dopravní infrastrukturu. V závěru práce je vyloženo, jak je možné takovýmto nepříznivým jevům předcházet a kolik finančních prostředků by bylo pro tyto události k potřeba.

Problematiku astronomických jevů, jež mají vliv na širokou škálu věcí a faktorů jsem si zvolil, jelikož toto téma bylo mým koníčkem ještě před nástupem na vysokou školu. Oblast těchto jevů, a hlavně slunečních bouří a erupcí, kterým se budu ve velké míře v této práci věnovat, je ve společnosti často neprávem opomíjena. Právě tyto úkazy mají z velké části vliv na elektronická zařízení, signál GPS, dopravní a jiné prostředky. Zároveň s tím je ohrožena ekologie, na kterou je třeba dbát.

Cílem této bakalářské práce je tedy čtenáře seznámit s touto problematikou a předat jim do povědomí jaká rizika z těchto jevů mohou vzniknout, a jak se v případě takových událostí zachovat. Zároveň si kladu za cíl popsat nejvýznačnější astronomické jevy s elektromagnetickými účinky a provést analýzu jejich ekonomických dopadů.

Hlavním zdrojem informací k mé práci byly kromě doporučené literatury a odborných článků, i publikace Doc. Mgr. Michala Švandy, Ph.D. Dále internetové stránky astronomického ústavu AV ČR, České astronomické společnosti a Národního úřadu pro letectví a vesmír (NASA).

2 Cíl a metodika práce

2.1 Cíl práce

Popis nejvýznačnějších astronomických jevů a jejich vlivu na energetickou a dopravní infrastrukturu včetně vysvětlení jejich původu a průběhu. Provedení analýzy jejich případných následků u zařízení (energetických, sdělovacích, bezpečnostních atd.) a dopravy i včetně ekonomických dopadů.

2.2 Metodika

Provedení analýzy astronomických jevů s elektromagnetickými účinky. Vypracování pravděpodobných rizikových následků příslušných astronomických jevů s případnými historickými událostmi. Rozebrání vybraných preventivních opatření k minimalizaci rizikových následků astronomických vlivů na dopravní a energetickou infrastrukturu.

3 Astronomické jevy a Slunce z hlediska fyziky

3.1 Definice astronomických jevů

Původ slova astronomie pochází ze dvou řeckých slov, přičemž astron znamená hvězda a nomos zákon. V České republice je astronomie jednou z přírodních věd, která se zabývá vesmírem jako celkem. Astronomie jako věda se tedy zabývá tím, jak vznikl vesmír, jakým prošel vývojem, jaká je jeho podstata, proč se vesmírná těla pohybují, a jak na sebe vzájemně působí jednotlivá tělesa působí. Z pohledu historie má astronomie své počátky již v raném starověku, a proto se tak jedná o jednu z nejstarších věd vůbec. Astronomie byla dlouhou dobu spojena s astrologií. Astrologie se však odlišovala od astronomie tím, že nepoužívala vědecké metody poznání, čímž následně degradovala a dnes se již neřadí mezi vědecké disciplíny. Slovo jev označuje úkaz nebo událost, kterou lze smyslově pozorovat.

[1]

Spojením těchto dvou slov tedy označujeme jakékoliv pozorovatelné události nebo úkazy ve vesmíru. Může jít o nebeské události jako jsou například meteorické roje, komety, polární záře, sluneční erupce, zatmění Slunce a Měsíce, nebo také o přechody planet. [1]

3.2 Slunce

Dále je třeba vysvětlit, co je Slunce, jakou se projevuje aktivitou a zmínit nějaké jeho základní charakteristiky. Slunce je hvězda tzv. hlavní posloupnosti, a proto je jedním z hlavních zájmů astronomů. Obíhá kolem středu mléčné dráhy a zároveň je středem planetárního systému, ve kterém se nachází i naše planeta Země - Sluneční soustavy. Podobně jako planety jsou i hvězdy útvary udržované vlastní gravitací, avšak na rozdíl od planet se ve vnitru hvězd uvolňuje vysoká energie z důvodu termonukleárních reakcí. [2]

Tato hvězda je 4,5 miliardy let stará. Z většiny je tvořena dvěma prvky, heliem a vodíkem, přičemž jejich poměr je podle moderních odhadů složen v závislosti na hmotnosti - 71% zabírá vodík, 27% helium a zbylá 2% tvoří další prvky, zejména pak kyslík, dusík a uhlík. Od Země je Slunce vzdáleno přibližně 150 milionů kilometrů (1 AU)¹ a jeho průměr je 1,4 milionu kilometrů. Nejžhavější částí Slunce je jeho jádro dosahující teploty až 15 milionů °C. Sluneční povrch (fotosféra) je chladnější s teplotou dosahující hodnot kolem 5 500 °C. Zajímavostí je, že vnější atmosféra Slunce nazývána koróna je tím žhavější, čím dále od povrchu se rozprostírá. Může dosahovat teploty až 2 miliony °C a je tedy mnohonásobně teplejší než fotosféra. [2, 3]

3.2.1 Hertzsprung-Russelův diagram

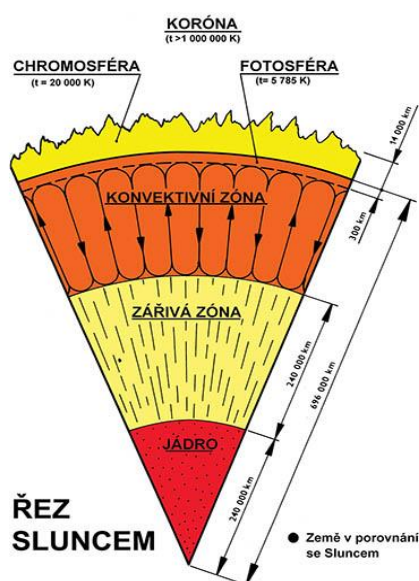
Již zmíněná hlavní posloupnost je křivka Hertzsprung-Russelova diagramu, kolem níž najdeme kromě Slunce i ostatní nerovnoměrně rozprostřené hvězdy. Jedná se o hvězdy u nichž se stoupající teplotou stoupá i zářivý výkon. Vyjma hvězd hlavní posloupnosti, se zde nacházejí i tři další větve a to veleobři (nadobři), obři a nejnižší bílí trpaslíci. [7,8]

¹ Zkratka AU je astronomická jednotka. Jde o označení vzdálenosti Země-Slunce tedy přibližně o 150 milionů kilometrů

3.3 Vrstvy Slunce

Sluneční těleso se skládá z mnoha vrstev. V jeho středu se nachází samotné jádro, kde nejsou přítomny ani molekuly vodíku, ani neutrální atomy vodíku. Bouřlivé a horké prostředí slunečního centra rozbíjí atomy na jednotlivé části - protony, elektrony a další holá atomová jádra. Vodík ve slunečním jádře je ionizovaný, holý proton, reprezentovaný symbolem p^+ . Právě tyto protony se slučují za uvolnění energie. [4]

Obrázek 1 Znárodnění slunečních vrstev v průřezu



Zdroj: <https://pozorovanislunce.eu/slunce/struktura-slunce.html>

Jádro je obklopeno slupkou, v níž není dostatečná teplota na zapálení a udržení reakce. Tento obal jádra se skládá ze zářivé a konvektivní zóny – řadí se tak mezi vnitřní vrstvy [2]

Mezi vnější vrstvy se řadí: fotosféra, chromosféra, přechodová oblast a koróna. Fotosféra je nejhlubší vrstvou Slunce, kterou lze přímo pozorovat. Teploty se zde pohybují v rozmezí 3700 až 6200 stupňů Celsia. Nejedná se o pevný povrch, nýbrž plynnou vrstvu tloušťky přibližně 100 km. Při dobrých pozorovacích podmínkách je možné vidět obraz sluneční fotosféry, který není zcela homogenní, ale má drobnou zrnitou strukturu nazývanou granulace, která je způsobena konvekcí². Chromosféra se nachází nad fotosférou a jsou zde i vyšší teploty a to od 3700 až do 7700 stupňů Celsia. Dále následuje přechodová oblast oddělující chromosféru od koróny. Tato oblast je také relativně tenká, dosahuje tloušťky

² Konvekce je děj zajišťující přenos energie z nitra na povrch Slunce.

pouze kolem 100 km. Rovněž jsou zde vyšší teploty, než v předchozí vrstvě, a to i navzdory tomu, že se nachází dále od žhnoucího jádra. Teploty začínají přibližně na 7700 stupních Celsia a končí až u hodnoty 500 000 stupňů Celsia. Poslední vrstvou je od jádra nejvzdálenější koróna, kterou lze spatřit pouhým okem při úplném zatmění Slunce. Hodnoty teplot v této vrstvě jsou opět vyšší a to v rozmezí od 500 000 až několik milionů stupňů Celsia. Odehrává se zde velké množství jevů, které budou rozebrány ještě v následujících kapitolách. [3,4,5,6]

3.4 Sluneční cykly

Sluneční cykly označují periodické změny v různých projevech sluneční aktivity. Zařazují se sem např. sluneční skvrny, sluneční erupce, radiové záření a tzv. fakule. Cyklus trvá v průměru 11 let, přičemž jeho začátek se považuje od minima sluneční aktivity, přes maximum při kterém je slunečních skvrn, erupcí a jiných projevů nejvíce, až do dalšího minima, kdy je Slunce opět méně aktivní. [9]

O jedenáctileté periodě spojené s výskytem slunečních skvrn věděli již v Číně zhruba před 2000 lety, avšak o znovuobjevení se postaral v roce 1843 Heinrich Schwabe. Jeho objev spočíval v pozorování Slunce po dobu 312 dní, při kterém zaznamenal pouze 34 skupin skvrn, přičemž o 6 roků dříve zaregistroval 333 skupin ve 168 dnech. Průběžným zaznamenáváním rok po roce vynášel počty dní, při kterých nezaregistroval na Slunci jedinou skvrnu a spatřil tak přibližnou jedenáctiletou cykličnost. [2]

3.4.1 Haleův cyklus

V roce 1890 George Ellery Hale učinil pomocí spektroheliografu objev, že původní jedenáctiletá perioda je částečně zkreslená, jelikož skutečná perioda musí být dvojnásobná, tedy cyklus trvající průměrně 22 let. Důvodem je výměna magnetické polarity mezi slunečními polokoulemi tzv. přepólování. Do návratu k původnímu stavu tak zbývá dalších 11 roků. [2,9]

3.4.2 Gleisebergův cyklus

Mezi další prokázané cykly patří Gleisebergův cyklus se střední délkou 87 roků (70 až 100 let). Projevuje se obměňováním amplitudy jedenáctiletého cyklu. V rámci této periody se pozměňují například maximální počty slunečních skvrn v maximech jedenáctiletého cyklu. [2]

3.4.3 Ostatní cykly

Detekování sluneční aktivity ukazuje i další cykličnosti, které mohou mít i kratší periodu než právě jedenáctiletý cyklus. Kupříkladu perioda trvající 27 dní, jenž jednoznačně souvisí se sluneční rotací, nebo perioda 150 dní ve výskytu slunečních erupcí. [2]

3.5 Magnetické Slunce

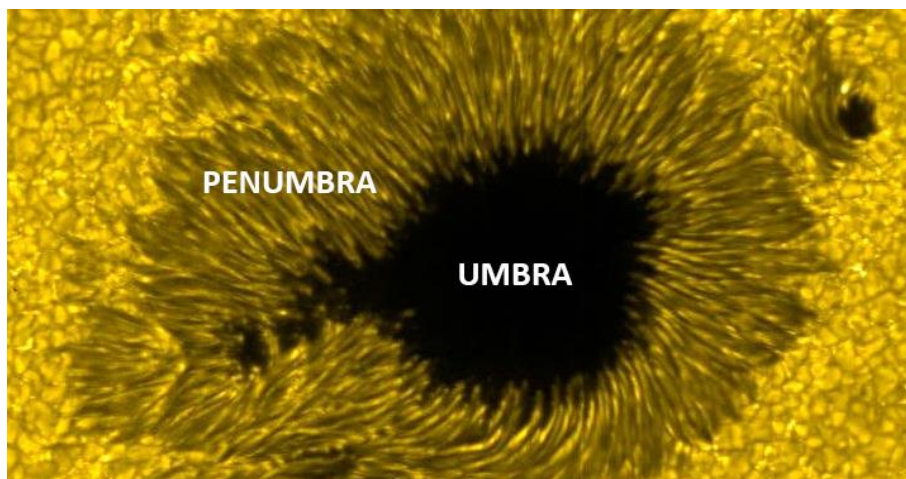
Hlavní roli ve slunečních cyklech sehrávají neustále měnící se lokální magnetická pole, která jsou příčinou vzniku slunečních skvrn, protuberancí, nebo vzplanutí slunečních erupcí. Ve Slunci je veškerá hmota ve stavu silně ionizovaného plazmatu. Tato hvězda je sice navenek elektricky neutrální, ale většina jednotlivých částic nese svůj specifický náboj. Působením Lorentzovy síly na tyto částice vzniká jejich spirálovitý pohyb kolem siločar magnetického pole. Rozžhavené plazma nesoucí teplo z nitra, se v takovéto oblasti nemůže dostat skrz magnetickou bariéru, čímž se do magnetických oblastí nedostává dostatek energie a oblast je tedy méně vyhřívána. Teplota slunečních skvrn dosahuje hodnoty kolem 4 000 stupňů C, zatímco teplota okolní fotosféry dosahuje ještě o 1 500 stupňů C více. Takovýto teplotní rozdíl zpřičiňuje, že se skvrny jeví pozorovateli jako velmi tmavé. [2]

3.5.1 Sluneční skvrny

Nejvýraznějším a rovněž nejdéle sledovaným projevem sluneční magnetické aktivity jsou sluneční skvrny. Výskyt sluneční skvrny značí nejen pokles teploty v daném místě, ale také díru ve fotosféře. Magnetické pole ve skvrně obsahuje jen minimální množství plazmatu a svým vlastním tlakem odtlačuje fotosféru do okolí. Důsledkem je vznik jakési pánve vyplněné magnetickým polem. [10]

Plně rozvinutá skvrna se skládá ze dvou částí. Vnitřní a zároveň nejchladnější pole skvrny se nazývá umbra a její magnetické pole je prakticky vertikální. Druhá, vnější část má název penumbra a ty se typicky vyznačuje formou radiálních vláken. [10]

Obrázek 2 Detailní ukázka sluneční skvrny



Zdroj: <https://www.spaceweatherlive.com/cs/pomoc/co-jsou-slunecni-skvrny.html>

3.5.2 Fakule

U okraje slunečního disku, je možné pozorovat jevy zvané fakule, které jsou úzce spojeny s výskytem slunečních skvrn. Na rozdíl od skvrn jsou fakule projevem slabších magnetických polí, jež nedokáží zcela ovlivňovat pohyb plazmatu. [10]

4 Planeta Země

Planeta Země vznikla podobně jako celá Sluneční soustava přibližně před 4,6 miliardy let. Z hlediska vzdálenosti se jedná o třetí planetu od Slunce, která jej obíhá. Povrch Země je z téměř 71 % pokrytý vodou, zbylých 29% zabírá souš, přičemž větší část se rozprostírá na severní polokouli. Atmosféra skládající se z malých částic vody a ledu, které mají bílou barvu, odráží 70-90 % slunečního světla a povrch pod mraky se tak méně zahřívá. Ačkoli to ze satelitních snímků není zcela vidět, tak tvar Země není úplně kulatý. Má nepravidelný tvar tzv. geoidu, který je zapříčiněn proměnlivostí gravitačního pole v důsledku nerovnoměrného rozložení hmoty uvnitř planety. Pojem geoid označuje fyzikální model zemského povrchu, který tvaruje pouze vlastní gravitace a rotace planety. [14]

4.1 Parametry Země

Rovníkový průměr je 12 756 km, což je 109 krát méně než hvězda ve středu naší sluneční soustavy – Slunce. Hmotnost činí $5,9736 \times 10^{24}$ kg. Střední vzdálenost od Slunce je 149,6 milionů kilometrů a doba potřebná k oběhu kolem středobodu sluneční soustavy trvá 365,2564 dní. Průměrná teplota se rok od roku zvyšuje a její průměr v roce 2023 dosahoval hodnoty 14,98 °C. [14,15]

4.2 Zemské vrstvy

V samotném středu se nachází zemské jádro, které se skládá ze dvou částí - pevné a tekuté. To pevné, vnitřní, má poloměr přibližně 1 250 kilometrů a jeho chemické složení je převážně železo a nikl. Díky těmto těžkým kovům má Země poměrně vysokou průměrnou hustotu. Rotace planety zapříčiňuje pohyb tekuté hmoty, která se nachází ve druhé, vnější, části jádra. Tyto dvě vrstvy jádra fungují jako dynamo a generují tak magnetické pole. [14]

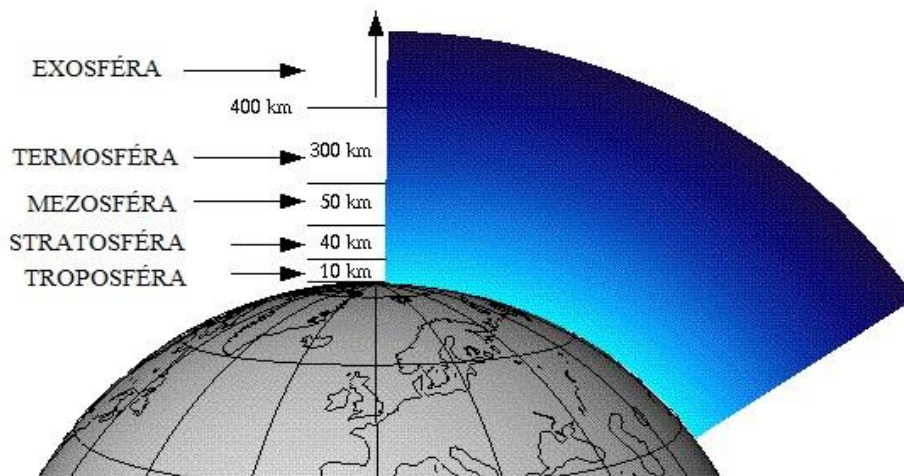
Další vrstvou obklopující jádro je plášť, který je opět složený ze dvou vrstev. Ta nižší vrstva leží přibližně 650 až 2 900 kilometrů pod povrchem a tvoří ji kyslíkaté sloučeniny křemíku obohacené o hliník, titan a kobalt. Spodní hranice svrchního pláště je v hloubce 650 kilometrů. [14]

Kůra představuje nejsvrchnější část, jejíž mocnost je v rozmezí 5 až 70 kilometrů. Nejtenčí je pod oceány, naproti tomu její tloušťka stoupá na kontinentech pod vysokými pohořími. Samotná kůra není jednolitá, neboť se skládá z litosférických nebo tektonických desek. Ony litosférické desky se zformovaly již v rané historii Země a od té doby se pohybují. V okolí jejich styku jsou oblasti náchylnější na zemětřesení a vulkanickou činnost. [14]

4.3 Vzdušný obal

Nad zemskou kůrou je planeta Země obklopena plynným obalem nazývaným atmosféra. Podobně jako Slunce a Země se atmosféra skládá z několika vrstev. [16]

Obrázek 3 Jednotlivé vrstvy zemské atmosféry



Zdroj: https://www.vedanasbavi.cz/orisek-299-zs-vnb-vi-10-atmosfera?ID_mesta=2&IDp=44

První vrstvou od zemského povrchu je troposféra, která dosahuje tloušťky od 8 do 14 kilometrů. Jedná se o nejhustší vrstvu, ve které se odehrává většina meteorologických jevů. V této vrstvě také létá mnoho komerčních proudových letadel, protože jim poskytuje dostatečný vztlak. Někdy se mohou pohybovat i nad její horní hranicí a zasahují tak do stratosféry. [16,17]

Nad troposférou se nachází stratosféra, která sahá až do výšky 50 kilometrů nad zemský povrch. V této části se nachází ozónová vrstva potřebná pro zemský život, jelikož pohlcuje a rozptyluje sluneční ultrafialové záření, z něhož cca 1 % proniká až k povrchu planety. [14,16]

Mezosféra je nejméně probádanou vrstvou. Pro pohyb letadel leží příliš vysoko a má nízkou hustotu vzduchu, ale pro kosmické družice naopak nízko. S rostoucí vzdáleností od zemského povrchu se teplota snižuje a může klesnout až k hodnotám kolem mínus 100 °C. Hlavní funkce mezoféry je ochrana před drobnými tělesy přilétajícími z vesmíru. Vzniká zde charakteristická světelná stopa neboli meteor, způsobená střetem miliard částíček plynu s meteoroidem. Začíná ve výšce 50 kilometrů a končí v 80 kilometrech nad zemským povrchem [14,16]

Pokračující vrstvou je termosféra, kde v důsledku slunečního záření teplota stoupá asi až ke 1 400 °C. Kvůli nízké hustotě vzduchu ji už není možné měřit tradičními metodami, ale je

nutné použít odvození od rychlosti pohybu molekul. Její výška činí 600 až 700 kilometrů od zemského povrchu. Součástí termosféry je také vrstva nazývaná ionosféra, která je důležitá pro šíření krátkých radiových vln, jež se od ní odrážejí a putují daleko od vysílače. Kupříkladu se jedná o systémy GPS a Galileo. Zde také vznikají polární záře a obíhají družice. [14,16]

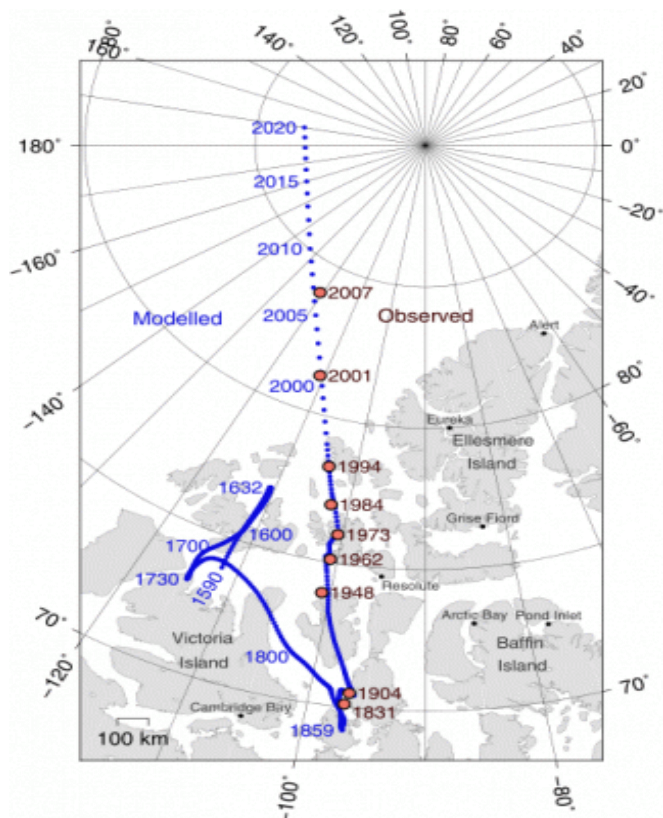
Poslední částí před samotným meziplanetárním prostorem tvoří vrstva exosféry. Teplota je zde skoro konstantní a to přibližně 2 200 °C. V hladině od 150 do 2000 km se nachází nízká oběžná dráha, na které se pohybuje přibližně 50 % všech funkčních satelitů. [14,16]

4.4 Magnetická Země

Vznik magnetických polí kolem planet je zapříčiněn obvykle dvěma způsoby. Tím prvním je tzv. fosilní magnetismus, tedy komplikované a slabé magnetické pole způsobené horninami, z nichž je planeta tvořena. Druhým typem je magnetické pole, které se neustále vytváří a obnovuje. V tomto případě je nutná přítomnost pohyblivých vodivých látek. U planety Země tedy natavených hornin v samotném jádru a to v podobě železa a niklu. Podmínkou je, aby se zmíněné látky vůči sobě pohybovaly s určitým stříhem, respektive se rychlost jejich pohybu v prostoru měnila s pozicí. [14]

Zemské magnetické pole má charakter magnetického dipólu a prostor jeho působení se nazývá magnetosférou. Osa současného magnetického pole je odchýlena od osy rotace o zhruba 11,5°. V místech, kde protíná povrch Země se nachází tzv. severní a jižní magnetický pól. Jejich poloha je dynamická, jelikož se pohybují s rychlostí 55 až 60 kilometrů za rok a nejsou shodné se zeměpisnými póly. [18]

Obrázek 4 Pohyb magnetického pólu



Zdroj: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/geofyzika/magneticke-pole-zeme>

4.4.1 Přepólování

Během procesu přepólování se magnetické pole razantně oslabí a následně znovu obnoví, přičemž v důsledku toho dojde k prohození polohy samotných pól - severní pól si vymění pozici s jižním pólem a naopak. Průměrně k přepólování dojde přibližně každých 500 000 let, ačkoli k poslednímu přepólování došlo zhruba před 780 000 lety. Bylo tak zjištěno na základě různě zmagnetizovaných starých hornin. [18,19]

5 Kosmické počasí

Na planetě Zemi probíhají změny teploty, tlaku, vlhkosti atp. nazývané počasí. Slunce se v tomto ohledu chová obdobně a byl proto zaveden podobný termín i pro situaci v meziplanetárním prostoru, nazýván kosmické počasí. Označuje se tak neustálý proud částic z rozpínající se koróny procházející celou sluneční soustavou. V astronomické praxi se ustálilo označení tohoto jevu jako sluneční vítr. [2]

5.1 Sledování kosmického počasí

Události na Slunci a souvislost s geomagnetickými bouřemi předvídal již Richard Carrington. Sluneční erupce z 1. září 1859, která po pár hodinách zasáhla planetu Zemi, kde vyvolala silnou geomagnetickou bouři. V důsledku toho se objevily série silných polárních září. R. Carrington vyslovil hypotézu vzájemné souvislosti zmíněných jevů. [2]

Obdobně jako u zemské atmosféry stále sledujeme pohyb oblačnosti v podobě vodní páry, tak v meziplanetárním prostoru se pohybují oblaka zmagnetizovaného plazmatu pocházející z koronálních výronů hmoty při slunečních erupcích. Současné predikce kosmického počasí se zaměřují hlavně na předpovídání stupně aktivity a to zda-li je možné aktivitu očekávat zvýšenou či sníženou. [2,10]

5.1.1 Krátkodobé předpovědi

Zakládají se na velké množině pozorovacích dat a zkušenosti pozorovatelů, kteří mají k dispozici možnost měření magnetických polí na odvrácené straně Slunce. Takovéto předpovědi jsou vydávány na dobu maximálně jednoho týden s přesností přesahující 80%. [10]

5.1.2 Dlouhodobé předpovědi

Na rozdíl od předpovědí krátkodobých jsou ty dlouhodobé mnohem náročnější. Reálné fyzikální pozadí slunečních cyklů a aktivit je stále málo probádané a jeho objevování postupuje velmi pomalu. Při předpovědích se používají dva postupy - statický a fyzikální. [10]

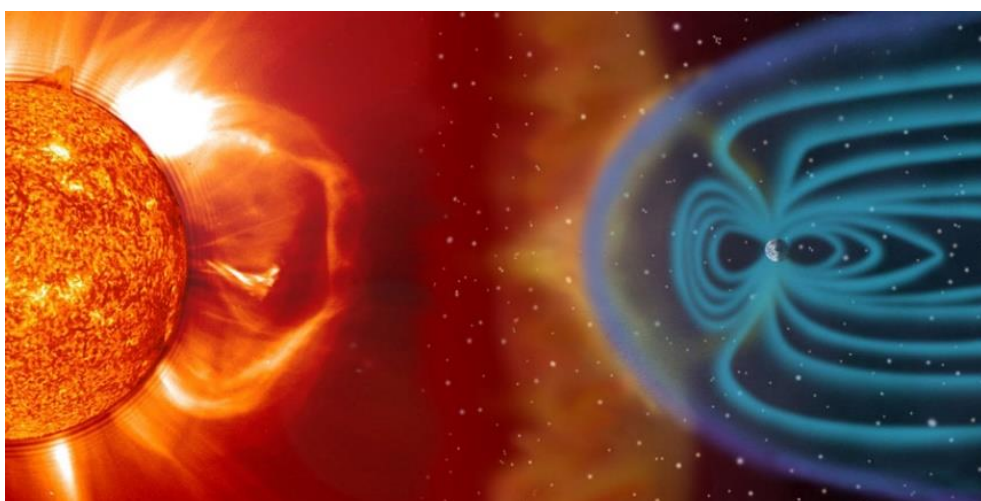
5.2 Sluneční vítr

Slunce emituje neustálý proud protonů, elektronů, alfa částic (jádra hélia) a magnetických polí souhrnně nazývaných pojmem sluneční vítr. Pokud se toto proudění pohybuje volným prostorem bez překážek, nic zvláštního se neděje. Problém nastává v okamžiku, když se mu postaví do cesty překážka, jako například planeta Země. Ve skutečnosti je ale první

překážkou její magnetosféra nikoli Země samotná. Nabité částice se v přítomnosti magnetického pole nemohou volně pohybovat. Samotná magnetosféra je vlivem slunečního větru deformována do svého charakteristického tvaru. Vzniká oblouková rázová vlna na denní straně a na druhé noční straně vzniká dlouhý magnetický chvost. Při styku slunečního větru s magnetickým polem Země jsou charakteristické polární kapsy, kterými nabité částice vnikají k blízkosti zemského povrchu. Část nabitých částic se zachycuje na magnetických silokřivkách zemského pole, kde se odrážejí tam a zpět mezi polárními oblastmi. [2,10,11]

Částečná oblast silokřivek zemského pole je přirozeným způsobem propojena s meziplanetárním magnetickým prostorem. Na konci, kde jsou silokřivky uzavřené, se v polárních oblastech tvoří plocha, po které do vyšších vrstev putují nabité částice, které excitují atomy a molekuly atmosféry a způsobují tak vznik polárních září. Polární záře vznikají ve výškách od 70 až do 500 kilometrů nad zemským povrchem. Ty, které lze lidským okem pozorovat jsou jen dolní částí tekoucích proudů. [11]

Obrázek 5 Sluneční vítr narážející na magnetosféru Země



Zdroj: <https://www.spaceweatherlive.com/cs/pomoc/slunecni-vitr.html>

Za obvyklých podmínek rychlé částice magnetosférickým deštníkem neproniknou – smýknou se po jeho povrchu a Zemi obtečou. Odlišná situace nastává v případě hustšího toku částic. Tyto částice sice stále nemohou prostupovat magnetosférou, nýbrž mohou penetrovat na její noční straně do polárních oblastí, kde je magnetické pole z části otevřené. Zde narážejí na atmosféru a zapříčiňují tak vznik polárních září. [2]

Charakteristiky slunečního větru v okolí Země jsou nepřetržitě měřeny pomocí družicových observatoří, kupříkladu ACE nebo WIND. Zkoumána je zde průměrná hustota a rychlost částic, která se pohybuje obvykle v rozmezí hodnot 300 km/s až 700 km/s. Jsou rozeznávány dva druhy větru - pomalý a rychlý. Pomalý vzniká v oblastech koronálních smyček s charakteristickou rychlostí kolem 300-400 km/s. Naproti tomu rychlý vítr míří do meziplanetárních oblastí z prostoru, kde jsou otevřeny siločáry magnetického pole, čili z oblastí koronálních děr. [10]

5.3 Geomagnetická bouře

Ke geomagnetické bouři dochází při narušení zemské magnetosféry. Příčinou je výměna energie ze slunečního větru do prostředí obklopujícího Zemi. Samotná magnetosféra se přizpůsobuje zvýšenému tlaku větru v souladu se zákonem zachování hybnosti, tím že zmenší svůj objem a mírně se přiblíží směrem k zemskému povrchu. Celou magnetosférou prostoupí pohybový impuls a následkem je geomagnetická bouře. Mezi její dva hlavní důsledky patří přiblížení vysokoenergetických částic k zemské atmosféře a změny magnetického pole doprovázené indukováním parazitních napětí a vznikem proudů ve vodičích. [2,12]

6 Hrozby pro elektronická zařízení

Nejvýznamnějšími energetickými procesy ve Sluneční soustavě jsou sluneční erupce a jejich následný vliv v zemské atmosféře. Konverzí silně naakumulované magnetické energie na různé druhy dalších energií, jako je například tepelná energie, záření nebo urychlené částice, hrozí riziko jejich následného šíření do meziplanetárního prostoru a k planetě Zemi v podobě již zmíněného slunečního větru, který zapříčiňuje poruchy zemské magnetosféry a ionosféry. [20]

6.1 Elektromagnetická indukce

Ke vzniku elektromagnetické indukce dochází při změnách magnetického pole, které se nazývá nestacionární. Pokud se v blízkosti cívky pohybuje magnet, tak se na cívkových vývodech začne indukovat elektrické napětí a při uzavřeném obvodu začne procházet proud.

Jelikož planeta Země má charakter magnetického dipólu a vytváří magnetické pole, nastává zde problém, v podobě interakce onoho pole a sluneční hmoty. Tato interakce generuje velké množství geomagneticky indukovaných napětí a proudů, které představují obrovské riziko v podstatě pro všechny rozvodné sítě a všechna elektronická zařízení. [21, 22, 23]

6.1.1 Vlastní indukčnost

Pokud vodivou smyčkou protéká proud, tak se ve smyčce indukuje magnetické pole a vnitřkem smyčky procházejí magnetické indukční čáry, v tomto důsledku prochází smyčkou magnetický indukční tok, který je přímo úměrný magnetické indukci a ta je přímo úměrná proudu, jež protéká smyčkou. Vlastní indukčnost ovlivňuje mnoho faktorů, jako například rozměry a počet závitů cívky nebo materiál jádra. Indukčnost se označuje velkým písmenem L a jednotkou je henry [H], která je pojmenovaná po Josephu Henrym. [24, 25, 26]

6.1.2 Magnetická indukce

Na rozdíl od elektromagnetické indukce, která spadá do kategorie fyzikálních jevů je ta magnetická fyzikální veličinou. V moderním světě nalézá využití především u hybridních vozů, seismografů, elektromotorů a elektrických generátorů. Magnetická indukce je plošnou hustotou magnetického toku a značí se velkým písmenem B a její jednotkou je tesla [T] – objevil Nikola Tesla. [21, 23, 24, 26]

Právě výkyvy slunečních erupcí mají za následek lokálně se měnící magnetickou indukci v řádech desítek až stovek nT. V klidovém stavu se indukce mění jen nepatrně a to zhruba o 20 nT. Pokud dojde k větším změnám, situace se označuje jako geomagnetická bouře. [27]

6.2 Vliv na rozvodné sítě

Zemská magnetosféra a ionosféra se skládají ze systému proudů, které se v průběhu geomagnetické bouře mění a generují tak časově proměnné elektrické pole, které ve vodivých materiálech na povrchu Země vyvolává nežádoucí elektrické proudy, často označované zkratkou GIC (geomagnetically induced current). Tyto proudy představují velké riziko pro silová vedení elektřiny, transformátory nebo metalické vedení telekomunikací. GIC vzrůstají s délkou vedení a zároveň zvyšují odpor, avšak jen do té doby než odpor

vedení převáží nad odporem smyčky. Délka vedení při které dochází k tomuto jevu se pohybuje obvykle kolem hodnot 150 až 200 kilometrů. [27, 28]

6.2.1 Transformátory

I když jsou geomagneticky indukované proudy v čase proměnné, tak jejich charakteristická perioda proměnnosti trvá pouze několik málo minut. GIC mají tedy proměnnou frekvenci v řádech mHz. V případě zařízení typu transformátor, který má navrhovanou pracovní frekvenci 50 Hz, se jeví GIC v podstatě jakou proudy stejnosměrné. Účinky GIC jsou poté pro většinu transformátorů destruktivní, jelikož posunují magnetizaci jejich jader po hysterezní křivce k přesycení v jedné z polarit. To vyvolává kvůli relativně dlouhodobému účinku nebezpečné situace – zahřívání transformátoru, olejová lázeň se rozkládá na plyny, jako je vodík, metan nebo acetylén a poté nastává poškození izolace mezi plechy. Nejhorších případech může dojít až k samotnému tavení jádra, nebo požáru olejové náplně. [27]

Obrázek 6 Zničený transformátor v elektrárně Salem (New Jersey) při geomagnetické bouři v roce 1989



Zdroj: <https://hackaday.com/2017/04/10/lights-out-in-quebec-the-1989-geomagnetic-storm/>

Kromě přehřívání způsobují GIC i vznik vyšších harmonických, čímž dojde k růstu přemagnetizačních ztrát transformátoru a následně hrozí pokles napětí v síti. Vyústěním této situace bývá kolaps sítě, neboli tzv. blackout. [29]

6.3 Vliv na mikroelektroniku

Tok částic z radiace slunečních bouří může ovlivnit výkon digitálních mikroelektronických systémů a způsobit zvýšení výskyt tzv. soft errors (v překladu měkkých chyb), které označují dočasnou poruchu polovodičů a paměťových čipů z určitých příčin. Výskyt těchto chyb je obvykle nepředvídatelný, čímž mohou vést k nesrozumitelným výpočetním chybám a omezovat tak výkony počítačů. [45]

Elektroniky používaná v různých typech vesmírného prostředí je náchylná ke dvěma typům radiace. První typ radiace je kumulativního charakteru, v průběhu času způsobuje degradaci výkonu digitálních mikroobvodů. Druhý typ radiace způsobuje destruktivní nebo nedestruktivní účinky. U destruktivních účinků obvykle dochází k náhlé poruše zařízení, přičemž u nedestruktivních účinků dochází pouze ke ztrátě dat, nebo ztrátou kontroly nad daným zařízením. [45]

6.4 Globální polohový systém

Navigační systémy, komunikační zařízení a další technologie využívají globální polohové systémy. Určují tak polohu pomocí radiových signálů ze satelitů. Nejběžnější globální systémy s celosvětovým pokrytím jsou - americký GPS, ruský GLONASS, evropský Galileo a čínský BeiDou. Jejich přesnost je závislá na ionosféře, ve které v důsledku sluneční aktivity mohou vznikat poruchy. Zhoršení signálu nebo jeho úplná ztráta může negativně ohrozit veškeré obory úzce pracující s přesnou navigací. [14, 28]

6.5 Informační a telekomunikační technologie

Dalším negativním důsledkem geomagnetických bouří je nepříznivé ovlivnění informačních technologií a internetu. V případě, že by nastal kolaps, vznikly by obrovské ztráty v kyberneticko-fyzických systémech. Následný výpadek by přímo ovlivnil ekonomickou stabilitu - například kryptoměny a akcie na burzách. V ohrožení by byli i samotní lidé, kteří by se nacházeli v dopravních prostředcích a zdravotnických zařízeních. [28, 30]

Telekomunikační technologie hrají většinou klíčovou roli v případech jakýchkoliv katastrof. Dnešní komunikační systémy s komplexní elektronikou, použitím optických vláken a hlubokomořských kabelů jsou mnohem zranitelnější vůči rušením způsobeným sluneční aktivitou než staré telegrafní systémy. I když tato oblast nebyla podrobně studována, mnoho nevysvětlených přerušení v telekomunikacích je přičítáno právě slunečním a geomagnetickým aktivitám. [45]

6.6 Vliv na satelity

Komunikační satelity rovněž patří mezi snadno postižitelné systémy, nikoli však v důsledku působení geomagneticky indukovaných proudů, ale vystavením se přímému kontaktu se silně nabitými částicemi z výronů koronální hmoty. Tyto částice se na zemský povrch nedostanou, protože jsou blokovány atmosférou. [30]

Hrozby pro komunikační satelity představují poškození elektronických součástí a nadbytečné tření na satelitu. To platí zejména u systémů na nízké oběžné dráze, jako je Starlink, což může zapříčinit jejich orbitální rozklad a pád na Zemi. [30]

6.7 Jaderné elektrárny

Po tragických událostech, které nastaly v Černobylu (1986) a Fukušimě (2011) je nutné dbát na ochranu jaderných elektráren v případě blackoutu. Jejich slabinou je nepřetržitá závislost na přísunu vody, která chladí jádro reaktoru. V situaci při které dojde k výpadku primárního chladicího okruhu je obtížné z reaktoru odebírat teplo. Sice je možné chladit reaktorovou nádobu zvenčí, ale takovýto způsob není příliš účinný. V případě, že není možné odebírat teplo dostatečně rychle, tak hrozí poškození reaktorové nádoby a únik radioaktivity. [31]

Základním ochranným opatřením jaderných elektráren ve Spojených státech je, že nejsou autonomní, tj. odebírají elektřinu pro provoz ze stejné sítě, která zásobuje celou zemi. Pokud dojde k výpadku dodávky napájení, musí se elektrárna vypnout. K dochlazování jádra poté dochází pomocí záložních dieselových generátorů a baterií. [32, 33]

6.7.1 Zabezpečení jaderné elektrárny Temelín

Díky neustále se zdokonalujícím technickým provedením patří jaderná elektrárna Temelín k jedním z nejbezpečnějších technických zařízení. Vnik možných poruch za provozu i tak nelze zcela vyloučit a kvůli tomu byla u jaderných elektráren vyvinuta zvláštní bezpečnostní opatření, která chrání jak personál a obyvatele v okolí elektrárny, tak i životní prostředí. [34]

Ve všech případech, při kterých by mohlo dojít k růstu teploty chladicí kapaliny v důsledku nežádoucího provozu, se výkon samovolně tlumí. V případě nedostatku chladiva a neodstavení reaktoru několikanásobně zálohovanou havarijní ochranou, by došlo k zastavení štěpné reakce, protože se v aktivní zóně reaktoru tvoří pára. Podíl na bezpečnosti má i samotné palivo Uran 238, který zasahuje do procesu štěpení tím, že sám absorbuje neutrony, aniž by se nadále štěpil. [34]

7 Vliv na dopravu

Kromě elektronických zařízení mají výrony koronální hmoty a s tím spojené účinky vliv i na dopravní prostředky a dopravní infrastrukturu. Jedním z rizik jsou právě poruchy navigačních systémů, které se využívají zejména v letecké, námořní, železniční a silniční dopravě. [2, 35]

Mezinárodní bezpečnostní pravidla vyžadují, aby bylo s letadlem navázáno nepřetržité spojení. Jenomže v důsledku geomagnetických bouří v polárních oblastech je to prakticky nemožné. Kromě výpadků radiového spojení je obrovským rizikem i nemožnost spoléhat na systém GPS. U takovýchto přístrojů je vyžadována znalost polohy s metrovou přesností a ty jsou právě během geomagnetické bouře v podstatě nepoužitelné. [2, 35]

V případě železniční dopravy se opět objevují nežádoucí geomagneticky indukované proudy, které mohou vyřadit většinu elektricky poháněných vlaků z provozu paralyzováním silnoproudého napájení. Dalším rizikem je ovlivnění signalizačních zařízení, která mohou nekontrolovaně pozměnit návěstní stavy, tj. své barevné indikace z červené na zelenou a také naopak. To může vést k nehodám. [36]

Podobně jako v případě železniční a letadlové dopravy i zde hrozí určitá rizika spojená s navigačními systémy. S tím jak jde automobilový vývoj stále kupředu, je toto odvětví více spjato s elektrifikací a tudíž je více náchylné k poruchám při geomagnetických bouřích. Ať už jde o automobil s klasickým spalovacím motorem, nebo elektromotorem, v případě výpadku elektrické sítě se stává v podstatě nemožné doplnit palivo na čerpací stanici, nebo vůz dobít u nabíjecí stanice. [37, 38]

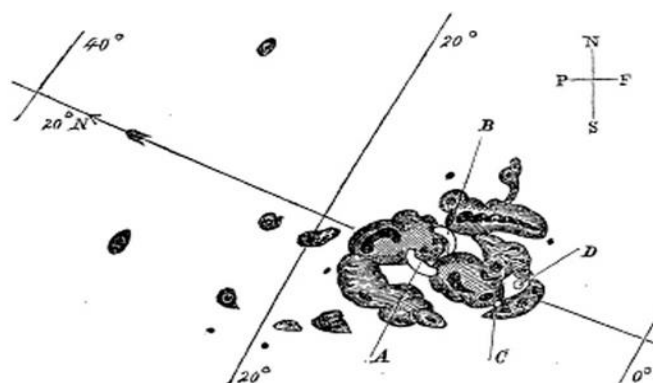
8 Historie slunečních bouří

Sluneční bouře zasáhly naši planetu Zemi již před několika tisíci lety. K tomuto objevu se dopracovali vědci zkoumáním hlubokých vrstev ledu pod Grónskem a Antarktidou. Objev spočíval ve zvýšeném výskytu radionuklidů, které vznikají při průniku kosmického záření do zemské atmosféry. [28, 39]

8.1 Carringtonova událost

Mezi jednu z prvních lépe zdokumentovaných událostí patří superbouře z roku 1859 pojmenována po R. Carringtonovi, který evidoval zvyšující se počet slunečních skvrn a vůbec poprvé v historii upozoroval bílou erupci. V následujících 48 h zasáhla Zemi silná geomagnetická bouře provázená sérií polárních září. Docházelo k výskytu polárních září i v regionech, kde se tak děje jen výjimečně, jako v subsaharských částech Afriky a v jižních oblastech Skalických hor v Severní Americe. Napříč Evropou a Spojenými státy americkými zcela selhala telegrafní síť, mnohokrát z telegrafních zařízení sršely výboje až na zem, což způsobilo požáry. [2, 27, 40]

Obrázek 7 Kresba R. Carringtona, která ukazuje polohu bílé erupce při jeho pozorování



Zdroj: <https://astronesia.blogspot.com/2012/11/badai-matahari-terhebat-pernah-terjadi.html>

8.2 Květen 1921

15. května roku 1921 v New Yorku v důsledku sluneční bouře geomagneticky indukované proudy vyvolaly požár telegrafu řídicí věže a následný výpadek celého signálního řídicího systému železniční infrastruktury ve městě. Ve většině Evropy byla v téže době narušena kabelová komunikace. [27]

8.3 Leden 1938

Silná geomagnetická bouře způsobila 22. ledna 1938 rozsáhlé problémy na železničním koridoru mezi Manchesterem a Sheffieldem. V důsledku GIC nefungovala správně signální zařízení. [27]

8.4 Březen 1989

Série chromosférických erupcí způsobila v okolí Hudsonova zálivu 13. března 1989 blackout rozvodné sítě vodní elektrárny Hydroquébec. Do páteřního vedení o napětí 735 kV pronikly GIC a provoz sítě se během 2 minut zhroutil. Následný výpadek dodávky energie trval asi 12 hodin. [2, 27, 29]

V tentýž den měla problémy i elektrárna Salem v New Jersey a elektrárna Hope Creek. Účinkem geomagneticky indukovaných proudů byla značně poškozena jádra zvyšovacích transformátorů. [27, 29, 40]

Kromě Severní Ameriky byla zasažena i část Evropy a Asie, kde byly rovněž hlášeny poruchy rozvodných sítí a rušení radiového signálu. [40]

Po této události se začalo dbát na větší ochranu energetické sítě a tak ve vodní elektrárně Hydroquébec byly nainstalovány sériové kondenzátory v hodně přibližně 1,2 miliardy amerických dolarů, které mají předcházet scénářům z předešlých let. [45]

8.5 Říjen 2003

30. října vyvolala sluneční bouře výpadek sítě ve švédském Malmö. Evidované amplitudy geomagnetických proudů dosahovaly hodnot až 600 A. V rozmezí dní 29. až 30. října bylo v Malmö a jeho okolí zaznamenáno celkově deset výpadků síťových zařízení. V tu samou dobu došlo k přerušení těžby ropy a plynu i na Aljašce. Následné celkové škody byly vyčísleny zhruba na 500 000 amerických dolarů. [27, 29]

8.6 Září 2017

Mohutná sluneční erupce z 6. září 2017 vyvolala geomagnetickou bouři, která způsobila silný výpadek radiového vysílání. Národní úřad pro oceán a atmosféru (NOAA) následně oznámil, že vysokofrekvenční radiové vysílání, které je hojně využíváno v letectví, námořní dopravě a dalších odvětvích, bylo toho dne na více než 8 hodin nedostupné. [28]

8.7 Únor 2022

Společnost SpaceX oznámila 20. února roku 2022 ztrátu 40 družic Starlink z celkového počtu 49, kterou způsobila silná sluneční bouře. Navzdory tomu, že jsou tyto družice vybaveny systémy, které slouží k ochraně před geomagnetickými bouřemi, nebylo možné tyto družice navést zpátky na vyšší orbitu. [28]

8.8 Koronální ejekce

Za zmínku ještě stojí trochu odlišný případ a to událost z 10. ledna 1997, kdy zemskou magnetosféru zasáhla mohutná koronální ejekce. Ta zapříčinila ztrátu americké spojovací družice AT&T Telstar 400, která stála 200 milionů dolarů. [2]

Podobná událost se stala 20. dubna 2002, když byl při cestě z Marsu poškozen japonský satelit Nozomi. Nenávratné poškození družice, tak vynutilo ukončení této mise následující rok. [2]

9 Možné způsoby ochrany

Základní nutností pro bezpečnost a ochranu infrastruktury a lidí samotných je neustálé sledování sluneční aktivity a s tím spojeného kosmického počasí (viz kapitola 4.1). Současné předpovědi počasí využívají modely vycházející z fyzikálních zákonů. Vstupními hodnotami jsou měřené fyzikální veličiny, o nichž se vědci domnívají, že jsou pro fungování slunečního procesu stěžejní. [10]

9.1 Systémy včasného varování

Aby bylo možné včas aktivovat systémy ochraňující infrastrukturu, je potřeba mít včas informace o blížících se slunečních bouřích, tak aby se co nejvíce zamezilo škodám, situacím ohrožující lidské životy a ekologickým katastrofám. K tomu napomáhají různé sondy a jednou z nejznámějších je sonda zvaná SOHO. Ta eviduje hlavně dění na slunečním povrchu, ale také sluneční vítr v meziplanetárním prostoru. Díky nepřetržitému toku informací ze sondy v podobě snímků a ostatních údajů o slunečních erupcích, jsou zaměstnanci NASA schopni včas varovat před možnými hrozbami a tak zajistit, co nejrychlejší ochranu zařízení na oběžné dráze a Zemi. [28]

9.2 Ochrana proti elektromagnetickému impulsu

Elektromagnetický impuls (EMP) způsobený výronem koronální hmoty je schopný poškodit nebo úplně zničit elektronická zařízení a jejich součásti. Je proto nutné tato zařízení chránit, přičemž jsou uváděné dva typy. Tím prvním je opatření technického charakteru, pod který spadají různé filtry a stínění. Druhým typem ochrany jsou technickoorganizační opatření sestávající z kontroly vodičů, izolace a připravenosti obsluhy na zajištění zabezpečení proti EMP. [40, 41]

9.2.1 Faradayova klec

Konstrukce využívána k blokování elektromagnetického pole. Jejím principem je soustředění elektrického náboje pouze na vodivém povrchu klece, nikoli v jejím vnitřku. Vnitřní prostor tak má určitý stupeň stínění pro dopadající elektromagnetické vlny. [40, 42]

9.2.2 Stínění

Elektromagnetické stínění vytváří jakousi bariéru kolem zařízení, čímž zamezuje rušení vnějšími vlivy z okolí. K elektromagnetickému stínění se využívají různé materiály, nejčastěji kovová fólie, či stínící oplet. Toto stínění je nutné provádět nejen kvůli rušení z okolí, ale i kvůli vzájemnému rušení součástek. Ukázkovým příkladem může být mobilní telefon, který má stíněný celulární vysílač, aby neovlivnil citlivou elektroniku a rovněž má i stínění blokující určité množství radiofrekvenčního záření, které by uživatel mohl absorbovat. [40, 43]

10 Vliv na zdraví osob

Života na planetě Zemi existuje již přes tři a půl miliardy let a během tohoto časového intervalu zasáhl naši atmosféru nespočet slunečních bouří, které nezpůsobily žádnou globální katastrofu v podobě hromadného vymírání fauny a flóry. [2,10]

Ultrafialové, rentgenové nebo gama záření, které je ve větší míře produkováno při slunečních erupcích, je z velké části pohlcováno ozónovou vrstvou. V případě, že se ozónová vrstva bude rozpadat, budou informace o vyšší sluneční aktivitě podstatnou součástí

každodenního života. Do naší atmosféry bude proudit více vysokoenergetického záření, které může být příčinou rakovinotvorného bujení. [10]

10.1 Rizika pro kosmonauty

Zde je situace trochu odlišná než na planetě Zemi, jelikož nejsou pod ochranným štítem v podobě magnetosféry. Jsou tak vystaveni nezdravému ionizačnímu záření. Vědci vyjadřují vliv ionizujícího záření veličinou – radiační dávka s jednotkou gray [Gy]. Dávka 1 Gy odpovídá situaci, kdy přicházející záření naakumuluje jeden joule v každém kilogramu hmotnosti, čili je měřena energie, kterou záření ve tkáni zanechá. Zmíněná radiační dávka patří k jedné z mála fyzikálních veličin, které spadají do tzv. aditivní skupiny, tedy sčítají se v průběhu celého života. [10]

Mezi jednotlivými částicemi je však rozdíl a to ten, že 1 Gy α -částic (jádra hélia) bude mít pro tkáň mnohem horší účinky než 1 Gy světelných fotonů. Kvůli tomu byla zavedena veličina zohledňující původ radiační dávky. Jedná se o tzv. ekvivalentní dávku s jednotkou sievert [Sv]. Ekvivalentní dávky způsobená běžnými přírodními zdroji se pohybuje kolem 2 až 5 mSv ročně, přičemž jednorázové vystavení člověka dávce 1 Sv vyvolá akutní nevolnost, 2 až 5 Sv způsobí vypadávání vlasů a kožní krvácení. Dávka nad 6 Sv je označována jako smrtelná. [10]

Astronauti, kteří by se nacházeli v nechráněné kosmické lodi v době, kdy by stejnou oblastí putoval plazmový oblak způsobený koronální ejekcí, tak by obdrželi jednorázovou dávku v rozmezí 1 až 10 Sv. [10]

10.2 Bezpečnost v letecké dopravě

Do výšek, ve kterých se pohybují dopravní letadla, snadněji proniká kosmické záření. Obsluha letadla a pasažéři tak dostávají při každém letu určité dávky záření. Jeden zaoceánský let odpovídá dávce přibližně jednoho rentgenového snímku plic. Díky povolání jsou tomuto záření nejvíce vystaveni piloti a letušky. Proto je palubní personál povinen absolvovat každoroční zdravotní prohlídky. [10]

11 Analýza nákladů a výdajů spojených se slunečními bouřemi

Podobně jako sluneční erupce a na to obvykle navazující geomagnetické bouře mohou způsobit globální pohromu, tak i škody způsobené přírodními vlivy mohou dosahovat nepředstavitelných rozměrů. Pro obyvatele zvyklé na určitý komfort v podobě každodenního používání mobilního telefonu, internetu, bankomatu, počítače, televize, ale i zdravotnických zařízení, obchodů s potravinami a ostatních služeb, je každý výpadek požadovaných služeb problémový. V principu tak není rozdílné, jestli je výpadek energetické sítě způsoben geomagnetickou bouří, nebo pouhým úderem blesku. [10]

Neznamená to, ale že by lidstvo mělo tyto reálné hrozby způsobené sluneční činností, brát na lehkou váhu. Fyzikové a vědečtí pracovníci neustále varují před katastrofickými následky sluneční aktivity, byť jsou málo pravděpodobné. Největším nebezpečím tak zůstává možný kolaps energetické sítě, který by vytvořil nepřestavitelný chaos. [10]

11.1 Ekonomické dopady dle studií

I přes neustálé monitorování kosmického počasí a slunečních erupcí je odhadování výše škod skoro nereálné. Odborný časopis *Space Weather* zveřejnil vědeckou studii zaměřující se na dopady sluneční bouře o síle, která zasahuje planetu Zemi přibližně jednou za sto let. Autoři studie kvantifikovali následky takové bouře pouze na Spojené státy americké. Za pouhý jeden den by ztráty dosahovaly přibližně hodnoty 41,5 miliard amerických dolarů. [44]

Nedávná studie z roku 2017 posunula odhad ekonomické ztráty za 24 hodin ještě dále. Pro extrémní sluneční bouři, která ovlivní elektrickou síť ve většině států (asi 66 % obyvatelstva USA) zjistila, že potenciální ekonomická ztráta by činila 45,1 miliardy dolarů za pouhý jeden den pro americkou ekonomiku, plus dalších 7 miliard dolarů denně pro globální ekonomiku. Tento odhad předpokládá pouze scénář, ve kterém jsou postiženy jen Spojené státy americké. V případě, že by sluneční bouře měla mezinárodní dopady, odhadované náklady by pravděpodobně výrazně vzrostly. [45]

Dopady závažných astronomických jevů na globální dodavatelské řetězce a globální ekonomiku byly předmětem studie, ve které byla poprvé použita metodologie vstup-výstup. Zkoumání bylo omezeno na systémové selhání energetické sítě pro události podobné té z roku 1989 v Severní Americe. Výsledkem studie bylo, že globální ekonomické dopady by dosáhly rozmezí hodnot od 2,4 až 3,4 bilionu amerických dolarů za rok. Následně by se hodnota odvíjela od doby, která by byla potřebná k obnově a nahrazení zničených transformátorů. [46]

Událost o síle Carringtonovi superbouře by způsobila katastrofální dopad s vážným poškozením transformátorů a trvalou ztrátou ostatních zařízení. Potřebná doba k opravě poškození by podle odhadů trvala v rozmezí 4 až 10 let. Následný ekonomický dopad se pohybuje v řádu bilionů dolarů a to kvůli nedostatku elektřiny po velmi dlouhé časové období. V samostatné analýze, která předpokládá prodloužené výpadky elektrické energie trvající od 16 dní po jeden až dva roky s minimální dobou výměny transformátorů pět měsíců, bylo navrženo, že odhadovaný celkový ekonomický náklad na bouři úrovně Carringtonovy události je 0,6 až 2,6 bilionu amerických dolarů ve Spojených státech. [46]

12 Závěr

Mezi cíle mé bakalářské práce s tématem „Astronomické jevy a jejich vliv na dopravní a energetickou infrastrukturu“ patřilo podrobné popsání nejvýznamnějších astronomických jevů s elektromagnetickými účinky, jejich původu a následné vyvození a popsání možných následků podle předešlých historických zkušeností.

Rozhodl jsem se nejdříve charakterizovat základní informace o hlavním zdroji astronomických jevů, a to Slunci. Věnoval jsem se popsání slunečních vrstev a jednotlivých slunečních cyklů, které mají podstatný vliv na následné výkyvy kosmického počasí. Dále bylo nutné popsat planetu Zemi a obzvláště její magnetické pole, které působí jako pomyslný štít právě před proudem zmagnetizovaných částic od Slunce. Poté jsem věnoval několik kapitol kosmickému počasí a s tím spojených astronomických jevů, u kterých jsem popsal jejich vliv na energetickou a dopravní infrastrukturu. V závěru této práce jsou rozebrány historické události a analýza jejich případných následků.

Vycházel jsem hlavně z odborné literatury Doc. Mgr. Michala Švandy, Ph.D, kterou jsem si zapůjčil v Jihočeské vědecké knihovně. Dále jsem čerpal informace z diplomových prací a odborných internetových článků, obzvláště z Národního úřadu pro letectví a vesmír – NASA.

Na základě zpracovaných informací a provedené analýzy představují astronomické jevy skutečné ohrožení energetické a dopravní infrastruktury. Zdraví osob je těmito jevy rovněž ohroženo, a to v důsledku záření, které je ve velké míře produkováno při slunečních erupcích. I přes znalost historických událostí mohou vědci následné ekonomické dopady jen obtížně vyčíslit, přičemž jejich výše by byla opravdu vysoká. Proto považuji za nutné brát veškeré ekonomické odhady a prognózy v této práci s určitou rezervou.

Možným rozšířením této práce by mohlo být podrobnější popsání způsobů ochrany s následným vlastním návrhem. Rovněž by bylo možné tuto práci obohatit o vlastní pozorování sluneční aktivity. Další možností by bylo popsání astronomických jevů i na ostatních planetách sluneční soustavy, popřípadě na přirozené družici planety Země – Měsíci.

13 Seznam použitých zdrojů

- [1] Minislovníček: Astronomie. In: *Hvězdárna v Rokycanech a Plzni* [online]. © 2023
Dostupné z: <https://www.hvr.cz/2010/10/06/minislovnicek-astronomie/>
- [2] ŠVANDA, Michal. *Pozorujeme Slunce zn. Amatérsky!* [online]. Vydalo Sdružení hvězdáren a planetárií za finančního přispění Ministerstva kultury České republiky. 2007
Dostupné z: <https://svanda.astronomie.cz/publikace/pub26.pdf>
- [3] Our Sun: Facts. In: *NASA* [online]. Dostupné z: <https://science.nasa.gov/sun/facts/>
- [4] Sunlight & Solar Heat. In: *NASA. Jet Propulsion Laboratory* [online] 2001. Dostupné z: https://solarsystem.nasa.gov/genesismission/gm2/science/sunlight_solar-heat/fusion_chemistry.htm
- [5] Layers of the Sun. In: *NASA* [online]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/image-article/layers-of-sun/>
- [6] The Photosphere. In: H. HATHAWAY, David. *NASA. Solar Physics Marshall Space Flight Center* [online]. Dostupné z: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/surface.shtml>
- [7] Hertzprungův - Russellův diagram. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2024
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1081-hertzprunguv-russelluv-diagram>
- [8] Life cycles of Stars. In: *NASA. Imagine The Universe* [online]. Dostupné z: https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/lifecycles/LC_main_p8.html
- [9] MARKOVÁ, Eva. Co je to sluneční cyklus? In: *Česká astronomická společnost* [online]. © 2024. Dostupné z: <https://www.astro.cz/clanky/slunecni-soustava/co-je-to-slunecni-cyklus.html>

- [10] ŠVANDA, Michal. *Slunce*. Praha: Aventinum, 2012. ISBN 978-80-7442-024-5.
- [11] KULHÁNEK, Petr a Jakub ROZEHNAL. *Hvězdy, planety, magnety*. Praha: Mladá fronta, 2007. Kolumbus. ISBN 978-80-204-1693-3.
- [12] GEOMAGNETIC STORMS. In: *National Weather Service* [online]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>
- [13] Space Weather: What impact do solar flares have on human activities? In: HOLMAN, Gordon. NASA. *Solar Flare Theory* [online]. 1996, 2007. Dostupné z: <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/spaceweather.htm>
- [14] GABZDYL, Pavel, Pavel KOTEN, František MARTINEK, et al. *Sluneční soustava: velká kniha*. Brno: Extra Publishing, 2023. Tajemství vesmíru. ISBN 978-80-7525-597-6
- [15] Global Climate Highlights 2023. In: *The Copernicus Climate Change Service* [online]. 2014. Dostupné z: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>
- [16] Earth's Atmospheric Layers. In: NASA [online]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/image-article/earths-atmospheric-layers-3/>
- [17] Aeroplane Fly in Which Layer of Atmosphere? In: *Aeroclass.org* [online]. Dostupné z: <https://www.aeroclass.org/aeroplane-fly-in-which-layer-of-atmosphere/>
- [18] KRÍŽEK, Marek. *Magnetické pole Země*. Univerzita Karlova katedra fyzické geografie. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/fyzgeo/krizekma/ke-stazeni/magneticke-pole-zeme/>
- [19] KRÁLOVÁ, Magda. MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ. In: *Eduportál Techmania* [online]. 2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/geofyzika/magneticke-pole-zeme>
- [20] HEINZEL, Petr. Sluneční erupce. In: *Pozorování Slunce* [online]. Dostupné z: <https://pozorovanislunce.eu/odborne-clanky/slunecni-erupce.html>

[21] Elektromagnetická indukce. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 – 2024. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/302-elektromagneticka-indukce>

[22] POŽÁR, Josef a Oldřich KRULÍK. *Elektromagnetická bouře jako katastrofický scénář pro moderní technickou společnost*. Ochrana a bezpečnost o. s. 2015 [online pdf]. Dostupné z: http://ochab.ezin.cz/O-a-B_2015_C/2015_C_05_pozar-krulik.pdf

[23] KRÁLOVÁ, Magda. ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE. In: *Eduportál Techmania* [online]. 2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticka-indukce/elektromagneticka-indukce>

[24] *Elektromagnetická indukce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně - ústav fyziky a materiálového inženýrství [online pdf]. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/el_mag/F1_12.pdf

[25] VLASTNÍ INDUKCE. In: *Eduportál Techmania* [online]. 2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticka-indukce/vlastni-indukce>

[26] VYBÍRAL, Bohumil. *Elektromagnetická indukce: Elektrodynamika 3* [online pdf]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>

[27] VÝBOŠŤOKOVÁ, Tatiana a Michal ŠVANDA. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Vliv sluneční aktivity na poruchy v české rozvodné síti* [online pdf]. © Jednota českých matematiků a fyziků. 2017. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/146925/PokrokyMFA_62-2017-3_4.pdf

[28] NAVRÁTIL, Aleš. *Magnetické bouře a jejich vliv na zabezpečovací systémy*. Zlín, 2022. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/51665/navr%c3%a1til_2022_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [29] SMIČKOVÁ, Anna. *Geomagnetické indukované proudy v rozvodné síti České republiky*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84988/F3-BP-2019-Smickova-Anna-Smickova_bakalarka%20%281%29.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [30] ABDU JYOTHI, Sangeetha. *Solar Superstorms: Planning for an Internet Apocalypse*. 2021. Academic work. University of California. Dostupné z: <https://ics.uci.edu/~sabdujyo/papers/sigcomm21-cme.pdf>
- [31] MAJLING, Eduard. Bezpečnější jaderné elektrárny? Účinnější chlazení může zabránit jaderným haváriím. In: *OEnergetice.cz* [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderna-elektrany/bezpecnejsi-jaderna-elektrany-ucinnejsi-chlazení-muze-zabranit-jadernym-havariim>
- [32] Cooling Power Plants. In: *World Nuclear Association* [online]. © 2016-2023. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx>
- [33] TRACTON, Steve. Are nuclear reactors vulnerable to solar storms? In: *The Washington Post* [online]. © 1996-2024. Dostupné z: https://www.washingtonpost.com/blogs/capital-weather-gang/post/are-nuclear-reactors-vulnerable-to-solar-storms/2011/03/16/ABeCTae_blog.html
- [34] Jaderná elektrárna Temelín: Technologie a zabezpečení. In: *Skupina ČEZ* [online]. c2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1>
- [35] *Solar storms: a new challenge on the horizon?* [online pdf]. In: . European Union: General Secretariat of the Council of the European Union, 2017, s. 1-16. ISBN 978-92-824-9642-8. Dostupné z: doi:10.2860/828523 QC-02-23-199-EN-N
- [36] Rail industry urged to consider safety risks of space weather. In: *Lancaster University* [online]. © 2024. Dostupné z: <https://www.lancaster.ac.uk/news/rail-industry-urged-to-consider-safety-risks-of-space-weather>

- [37] R. K. NARLA, Siva. *The Evolution of Connected Vehicle Technology: From Smart Drivers to Smart Cars to* [online]. 2013. IT Journal, c2024. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b808c3a8ca2f70d223e0cdf69867fab0a39473fb>
- [38] A. ADDERLY, Shawn, Daria MANUKIAN, Timothy D. SULLIVAN a Mun SON. Electric vehicles and natural disaster policy implications. In: *Energy Policy* [online]. ScienceDirect, 2018, s. 437-448. ISBN 0301-4215. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517305906>
- [39] I. PALEARI, Chiara et al. Cosmogenic radionuclides reveal an extreme solar particle storm near a solar minimum 9125 years BP. In: *Nature communications* [online]. © 2024. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27891-4>
- [40] ČÍŽEK, Jan. *Rizika elektromagnetického impulsu v intravilánu obce*. Zlín, 2023. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/53297/%c4%8d%c3%ad%c5%beek_2023_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [41] Are We Ready for the Next Big Solar Storm? In: *EIS Council* [online]. c2024. Dostupné z: <https://eiscouncil.org/ready-for-a-solar-storm-hit-earth/>
- [42] NASA TECHNICAL HANDBOOK: MITIGATING IN-SPACE CHARGING EFFECTS [online pdf]. Office of the NASA Chief Engineer. NASA, 2022. Dostupné z: <https://standards.nasa.gov/sites/default/files/standards/NASA/B/0/2022-06-07-NASA-HDBK-4002B-Approved.pdf>
- [43] Celulární (buňkový) princip. In: PETERKA, Jiří. *EArchiv.cz* [online]. 1996. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a008s200/a008s201.php3>
- [44] KARLÍK, Tomáš. Silná sluneční bouře způsobí škody za 40 miliard dolarů. Denně. In: *ČT24* [online]. c2024. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/veda/silna-slunecni-boure-zpusobi-skody-za-40-miliard-dolaru-denne-103723>

[45] RISWADKAR, A. V. a Buddy DOBBINS. *Solar Storms: Protecting Your Operations Against the Sun's 'Dark Side'* [online pdf]. Zurich Services Corporation, 2010. Dostupné z: <https://www.nuevatribuna.es/media/nuevatribuna/files/2014/02/06/solarstorms.pdf>

[46] EASTWOOD, J. P. et al. The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand? In: WILEY, John. *Wiley Online Library* [online]. © 1999-2024. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/risa.12765>