



Středoškolská technika 2019

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

STRATOSFÉRA

Jakub Dvořák

**Střední průmyslová škola sdělovací techniky
Panská 856/3 Praha 1**

ANOTACE

Tato práce se zabývá popisem a měřením podmínek ve stratosféře. Mezi naměřená data patří teplota vzduchu, atmosférický tlak, hodnota radiace a rychlost a směr větru. Naměřená data jsou vyhodnocena a znázorněna v různých grafech.

Klíčová slova: aerologie, atmosféra, meteorologie, měření, počasí, radiace, stratosféra

ANNOTATION

This thesis is focused on measuring conditions in the stratosphere. Measured data include air temperature, atmospheric pressure, amount of radiation and wind speed and direction. The collected data is analysed and shown in different graphs.

Keywords: aerology, atmosphere, meteorology, measuring, radiation, stratosphere, weather

Obsah

1 Úvod	3
2 Stavba sondy	4
2.1 Přístroje na palubě	4
2.1.1 Kamery	4
2.1.2 Palubní počítač	4
2.1.3 Sledovač sondy	5
2.1.3.1 GSM tracker	5
2.1.3.2 APRS	5
2.1.3.3 Satelitní sledovač	6
2.1.3.4 Maják	7
2.1.4 Geigerův-Müllerův počítač	7
2.2 Testování elektroniky	8
2.3 První vypuštění	9
2.4 Nutná vylepšení	10
2.5 Druhé vypuštění	11
2.6 Zpracování dat	13
2.6.1 První vypuštění	13
2.6.2 Druhé vypuštění	16
3 Závěr	19
Seznam použitých značek a symbolů	20
Seznam použité literatury a zdrojů informací	22
Seznam použitého softwaru	23

1 Úvod

Stavba sondy osazené měřicími přístroji a její následně vypuštění do stratosféry byl můj sen, který jsem si chtěl splnit. Díky úspěchu v soutěži zaměřené na natáčení výukového videa jsem získal i finanční prostředky na realizaci tohoto snu.

Náplní mé absolventské práce je měření podmínek ve vyšších vrstvách atmosféry. Objev stratosféry značným způsobem změnil předpovídání počasí a otevřel nové způsoby pro přesnější předpovědi. Díky objevu inverze teploty a stratosféry nepovažujeme atmosféru za jednu vrstvu, kde teplota s výškou stále klesá, ale dělíme ji na různé vrstvy. Tyto vrstvy jsou na sobě zcela nezávislé a pro každou z nich je závislost teploty na nadmořské výšce jiná.

Má práce obsahuje popis mnou vytvořené sondy a přístrojů na ní. Zmiňuji se o metodách přenosu dat mezi meteorologickou sondou a zemí. Následně popisuji zpracovávání dat ze dvou vypouštění sondy, hodnoty znázorňuji v grafech a vyvozují závěry.

2 Stavba sondy

Jelikož jsem s vypouštěním balónu do stratosféry neměl žádné zkušenosti a jelikož se při vypouštění nesmí udělat žádná chyba, napsal jsem na oddělení aerologických měření ČHMÚ, zda bych mohl mou první sondu vypustit od nich. Jelikož mají od Úřadu pro civilní letectví (dále ÚCL) povolení na vypouštění sond až do celkové hmotnosti 600 g, mohl jsem pod jejich 80g sondu zavěsit i mou, kterou jsem musel postavit s hmotností do 520 g. Z důvodu takto omezené hmotnosti jsem měl možnost na sondu umístit pouze kameru, palubní počítač, 4 tužkové baterie pro napájení elektroniky na palubě a satelitní sledovač pro sledování aktuální polohy sondy.

2.1 Přístroje na palubě

2.1.1 Kamery

Jako palubní kameru jsem zvolil *GoPro Hero 7 black*. Jedná se o nejnovější model, který je vhodný především díky své velmi bytelné konstrukci, vysoké teplotní odolnosti a možnosti nahrávání v rozlišení 4k při 60 snímcích za sekundu.

Sekundární kamera použitá na palubě při druhém letu byla *GoPro fusion*. Jedná se o sférickou kameru, která má dva objektivy se záběrem 180°. Díky tomu jsem mohl posléze v počítači zkombinovat záběry z obou objektivů do jednoho sférického videa.

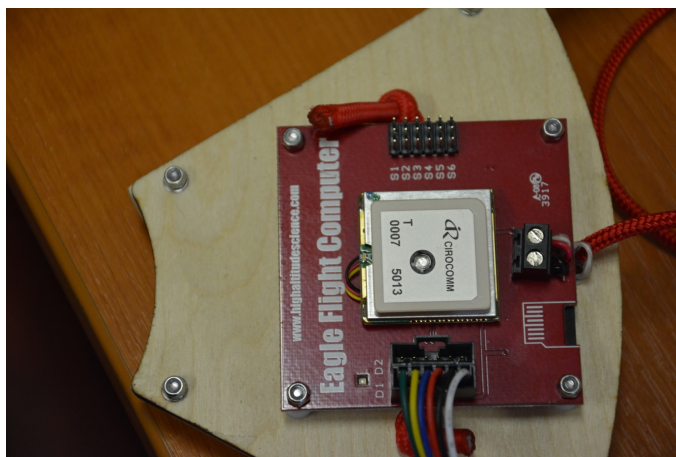
2.1.2 Palubní počítač

Palubní počítač byl koupen spolu s rámem. Výrobcem je americká firma *High altitude science*, která se specializuje na vývoj řešení pro záznam dat ve vyšších vrstvách atmosféry. Jde o robustní řešení, téměř nerozbitné a přichází s podrobným manuálem nejen k použití počítače, ale i k samotnému vypuštění balónu. Na vrchu počítače je GPS anténa (obr. 1).

K tomuto počítači se připojí teplotní a tlaková sonda a data jsou každých 6 sekund spolu s aktuální pozicí zapisována na MicroSD kartu, jak je vidět v tabulce 1.

Datum	Čas - UTC	Zem. šířka (°)	Zem. délka (°)	Orientace (°)
03/09/19	14:00:18	+049.37841	+016.94580	0151
Rychlost ($\frac{\text{km}}{\text{h}}$)	Nadm. výška (m)	Stav GPS signálu	Teplota (°C)	Tlak (Pa)
0074	+025081	0003	-035.8	001852

Tabulka 1: Data zaznamenávána palubním počítačem



Obrázek 1: Palubní počítač

2.1.3 Sledovač sondy

Sledování sondy mohlo být zajištěno více způsoby. Ve většině případů se nicméně jedná o získání GPS souřadnic sondy a jejich následné zaslání mně. Abych sondu našel, bylo nutné zajistit spolehlivý přenos GPS dat. Takové zařízení nazýváme tracker, neboli sledovač. Jedná se o zařízení, které má GPS modul a je schopno data posílat buď přes satelit, internet, nebo přímo vysílačem na zem. Pro sledování sondy existují 3 používané metody.

2.1.3.1 GSM tracker

Amatéry často využívána, nicméně velmi nedoporučovaná metoda je zasílání dat přes mobilní síť. Tato metoda není vhodná, jelikož telefon nevydrží v extrémních podmínkách, jenž se vyskytují ve stratosféře. Další problém je ztráta signálu. GSM síť, přes které se data posílají, jsou aktivní přibližně do výšky 10 km, není tudíž možné dále sledovat sondu. Výška se může měnit, avšak GSM antény jsou orientovány na zem, kde je většina uživatelů, ne na oblohu. Velké množství sond také přistane v neobydlených a odlehlých oblastech, ve kterých nemusí být žádný signál.

2.1.3.2 APRS

APRS (*Automatic Packet Reporting System*) je radioamatéry často využívaný způsob sledování sondy, jelikož jde o způsob levný a spolehlivý a většina radioamatérů má vlastní vybavení pro posílání dat přes APRS. Základem je APRS vysílač, který si můžeme koupit, nebo postavit. GPS data, spolu například s teplotou a tlakem, jsou následně takto vysílána a přijímána amatérskými rádii [4]. Data se poté buď pošlou dál, nebo se nahrají na internetovou stránku k tomuto účelu zřízenou, odkud je může každý sledovat. Velkou

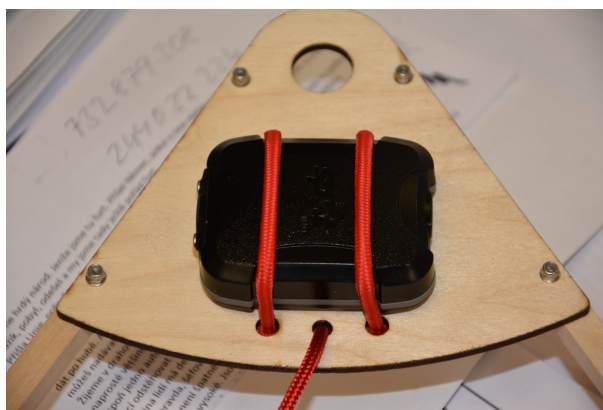
nevýhodou APRS sledovače je bohužel to, že pokud sonda přistane v neobydlené a odlehlé oblasti, kde nejsou žádné amatérské rádiové stanice, není možno data odeslat. Proto je APRS sledovač vhodný pouze jako záloha, nebo doplnění, není dobré na něj spoléhat se stoprocentní jistotou. Pokud se vysílači nepovede vyslat souřadnice místa dopadu, můžeme přesto APRS vysílači najít pomocí přijímače elektromagnetického vlnění, naladěného na vysílací frekvenci, a směrové antény.

2.1.3.3 Satelitní sledovač

Satelitní sledovač (obr. 2) je dle výrobců palubního počítače velmi spolehlivé řešení sledování sondy [4]. Pro mé potřeby jsem použil sledovač Spot Trace. Původní účel tohoto zařízení je sledování majetku v případě odcizení, nicméně toto zařízení se osvědčilo také při sledování sond. Získaná data o poloze se posílají přes síť satelitů na nízké oběžné dráze Země. Využívána je služba *Globalstar*, jež se specializuje na provoz satelitních telefonů. Ze satelitů jsou následně data poslána na speciální internetovou stránku, kde jsou přístupná například z počítače, nebo mobilní aplikace. Pozice lze také zaslat přes SMS bránu, jako zprávu na mobilní telefon.

Toto řešení má nicméně i své nevýhody. GPS čip ve sledovači je zamknutý do maximální výšky 6 500 m n. m. [5]. Kvůli tomu nastane po dosažení takové výšky tzv. blackout, kdy GPS čip přestane reagovat. Po následném sestupu sondy pod hladinu 6 500 m n. m. se GPS čip opět připojí a sledovač opět začne fungovat. Další z problémů je fakt, že sledovač musí mít GPS anténu neustále nasměrovanou k obloze, tudíž, pokud se při dopadu sonda nějak překlopí, není možné zaměřit její pozici. Má sonda je naštěstí konstruována s těžištěm položeným co nejnižše, tudíž je její překlopení velmi nepravděpodobné. Třetí nevýhodou je nutné roční předplatné, jelikož jsou využívány soukromé satelity na přenos dat.

Satelitní sledovač se zdál být nejlepším řešením, jelikož byl dodán spolu s palubním počítačem a jelikož k němu nebylo nutné žádné další vybavení.



Obrázek 2: Satelitní sledovač SPOT Trace

2.1.3.4 Maják

Pokud známe pouze přibližné místo dopadu, nebo chceme ještě zvýšit šance, že bude sonda nalezena, lze na sondu připevnit hlasitý bzučák/pípák. Zvýší se tak šance, náhodný kolemjdoucí sondu najde a zavolá na číslo uvedené na konstrukci sondy. Toto je pouze doplněk a v žádném případě by se na něj nemělo spoléhat. Pokud balón dosedne v odlehlé hustě zalesněné oblasti, bude to pouze zbytečná zátěž.

Další druh majáku je vysílač elektromagnetického vlnění o malém výkonu. Pokud zvolíme správnou frekvenci (2,4 GHz aj., které lze o malém výkonu vysílat bez radioamatérské licence), můžeme toto malé zařízení implementovat do vybavení sondy a později pomocí směrové antény určovat směr, kde se sonda po dopadu nachází. Díky tomu sondu najdeme na větší vzdálenost, než podle akustického majáku.

2.1.4 Geigerův-Müllerův počítač

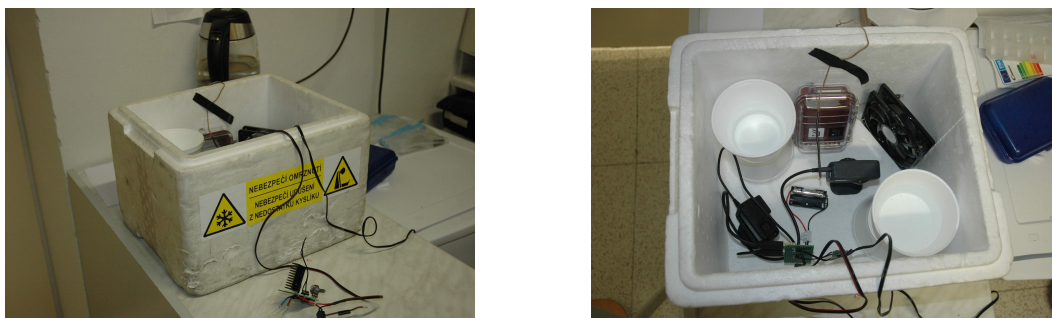
Geiger-Müllerův počítač je přístroj na měření radioaktivního záření. Hlavní částí je Geiger-Müllerova trubice. Tato trubice je plněna inertním plynem, v mém případě neonem. Uprostřed trubice je katoda, na kterou je přivedeno napětí -500 V. Pokud do trubice vletí částice, ionizuje plyn v trubici a nastane lavinová ionizace. Volné elektrony jsou následně přitahovány na stěnu trubice, čímž vznikne elektrický proud. Tento proud se měří a určuje se pomocí něho úroveň radiace [15]. Použitý Geiger-Müllerův počítač od organizace *Safecast* je vhodný pro vypouštění, jelikož je relativně malý a spolu s naměřenými daty je ukládána i aktuální poloha přístroje. Navíc je v odolné krabičce, chráněný před nárazy a nízkým tlakem, kterému bude v horních vrstvách atmosféry vystaven.



Obrázek 3: Geiger-Müllerův počítač

2.2 Testování elektroniky

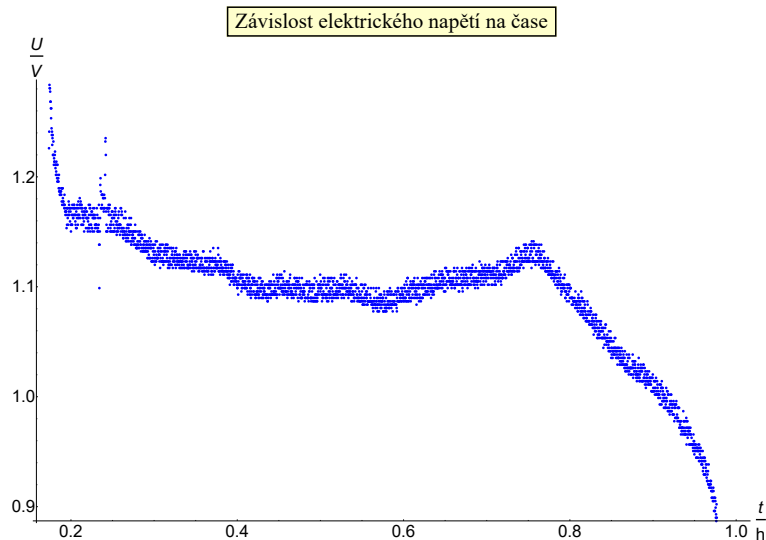
Abych před prvním vypuštěním objevil všechny nedostatky, bylo důležité veškerou elektroniku, která byla později umístěna na palubě sondy, podrobit testování. Testování probíhalo v polystyrenovém boxu s výpary kapalného dusíku (obr. 4), získaných přidáním vody; teplota kapalného dusíku byla pro potřeby testování zbytečně nízká. Spolu s elektronikou jsem testoval i vliv teploty na kapacitu baterií, abych věděl, kolik jich budu potřebovat pro napájení kamer a palubního počítače po celou dobu letu. S ohledem na potřebnou nízkou hmotnost, ale vysokou kapacitu jsem vybral lithiové baterie *Energizer Ultimate Lithium*. Ačkoliv k nim existuje datasheet s hodnotami danými výrobcem, pro získání přesnějších hodnot, jsem baterii musel proměřit sám. Při měření jsem měl baterii připojenou k umělé zátěži, která ji vybíjela konstantním proudem. Obvod porovnával úbytek napětí na výkonovém rezistoru, porovnával ho s potenciometrem nastaveným napětím a dle potřeby spíná výkonový MOSFET, čímž udržuje konstantní úbytek napětí, resp. konstantní proud, procházející rezistorem. Napětí na baterii bylo měřeno voltmetrem firmy Vernier a zaznamenáváno. Díky tomu jsem poté mohl přesně analyzovat naměřené hodnoty a vykreslit graf závislosti napětí na čase vybíjení při teplotě $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (graf 1).



Obrázek 4: Testování elektroniky

U článku měřené baterie jsem naměřil hraniční napětí článku 1 V. Poté napětí na baterii velmi rychle klesá. Díky tomu vím, že je nutné dát do série 5 článků, aby bylo zajištěno napětí vyšší než 5 V, které je potřebné pro napájení kamer a ostatní elektroniky na palubě.

Měření kamer probíhalo spolu s měřením baterií. Cílem bylo jednak zjistit, zdali vydrží tak nízké teploty a také jestli je nutné k již tak poměrně omezené hmotnosti přidávat další zátěž ponecháním vlastních akumulátorů. i po hodině a půl v prostředí s teplotami kolem $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ kamery stále nahrávaly, není je tudíž nutné dávat do žádného obalu, ani ponechávat akumulátory po dobu letu.



Graf 1: Závislost elektrického napětí baterie na čase při konstantním odběru proudu

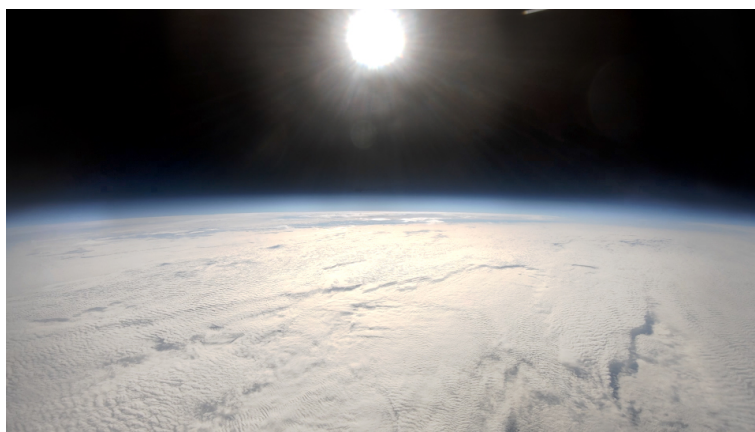
2.3 První vypuštění

V sobotu 3. 11. 2018 ve 12:00 světového koordinovaného času, tj. 12:17 místního času, byla první sonda vypuštěna (obr. 5) a já měl ihned možnost sledovat její pohyb na telefonu, jelikož souřadnice byly každých 5 minut odesílány na web společnosti SPOT. Spolu s mou sondou byla vyslána i sonda ČHMÚ, které se bohužel v 16 km nad zemí přeřízlo lanko o konstrukci mé sondy. Tato sonda se odpojila přibližně nad městem Čelákovice. Ve 13:27 místního času se signál mé sondy ztratil, jelikož sonda vyletěla nad výškovou hranici, kde je již GPS omezena (sonda byla v tu dobu ve výšce 28 km). Po navázání kontaktu byla sonda nad Chlumcem nad Cidlinou. Sonda se pohybovala směrem k Hradci Králové. Ve 14:37 sonda dosedla na pole přibližně 7 km od Hradce Králové. My v tu dobu vyrazili z Poděbrad a přibližně za hodinu sondu našli. Ohlášená pozice byla na metr přesně, nebyl tudíž problém ji najít, navíc byla vidět už z dálky.



Obrázek 5: Vypouštění sondy z observatoře v Libuši

Jelikož byla hmotnost mé sondy omezena povolením, jenž ÚCL vydal ČHMÚ, nemohl jsem použít tolik baterií, čímž bych zvýšil celkovou kapacitu. Baterie stačily na napájení palubního počítače a kamery na přibližně hodinu a 30 minut. Při analyzování dat jsem zjistil, že se měření GPS pozice a výšky měřené také pomocí GPS se ve výšce 23-31 km zastavilo. Toto bylo způsobeno poklesem napětí článků baterie. Ostatní funkce palubního počítače fungovaly, jelikož nepotřebovaly tak vysoké napětí pro provoz, jako potřeboval GPS přijímač. Pokles napětí na baterii byl způsoben teplotou -46°C a velkým odběrem proudu kamerou *GoPro Hero 7 black*. Napětí dále klesalo vlivem nízké teploty a začalo růst, až sonda vystoupala do stratosféry s vyšší okolní teplotou. Díky ohřátí baterií jejich napětí opět vzrostlo a funkce GPS senzoru se obnovila. Jelikož jak palubní počítač, tak kamera byly napájeny z jednoho zdroje, baterie bohužel nevydržely po celou dobu letu. Ve výšce 35,3 km napětí baterií kleslo na takovou úroveň, že se záznam dat zastavil úplně. Dle provedených výpočtů by se nicméně balón nedostal o moc výše, můžeme tedy tuto výšku považovat za maximální dosaženou.



Obrázek 6: Snímek těsně před ukončením nahrávání videa ve výšce 27 626 m

2.4 Nutná vylepšení

Druhé vypuštění bylo na rozdíl od toho prvního nutné koordinovat s ÚCL. Hmotnost sondy byla pod hranici 2 kg, čímž se celý proces usnadnil. Jelikož na celou akci dohlížel ÚCL, před vydáním povolení jim bylo nutné přinést sondu ke kontrole, aby Ing. Petr Plaček, vedoucí oddělení bezpilotních systémů, který mi pomáhal vyplňovat žádost, viděl, zda je vše v pořádku. Při konzultaci ještě poradil, jaké úpravy musím udělat. Tyto drobné úpravy pak již stačilo zaslat formou fotodokumentace. Dle Ing. Plačka bylo nutné obalit rohy molitanem, aby byl náraz na překážku měkčí. Lat'ka, na které je Geigerův-Müllerův počítač, musela být vyztužena. Všechny přístroje na palubě bylo potřeba samostatně uvázat k hornímu úvazu sondy, aby ani po případném uvolnění nespadly na zem.

2.5 Druhé vypuštění

Před druhým vypuštěním s těžší sondou (obr. 7) bylo potřeba vyjednat povolení ke vzletu. První schůzku na půdě ÚCL jsem měl s Ing. Plačkem již na začátku léta 2018. Zde jsem se dozvěděl, co vše takové vypuštění obnáší a na co si při stavbě sondy musím dát pozor. Další schůzka se konala v lednu 2019, kde jsem již řešil podrobnosti ohledně vyplňování *Žádosti o povolení k letu balónu bez pilota na palubě*. Také jsem se dozvěděl, že podmínkou vydání povolení je sjednané *Pojištění odpovědnosti za škody způsobené provozem letadel*. Třetí, již zmíněná schůzka, proběhla ve středu před vypuštěním. V pátek, ihned po zaplacení správního poplatku ve výši 4000 Kč, bylo povolení vystavené a vše bylo připravené na vzlet.

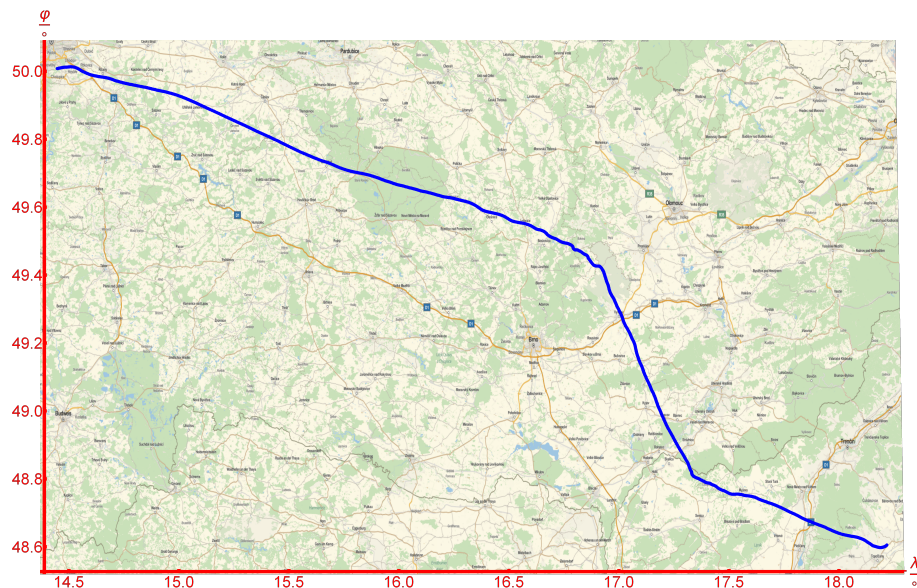


Obrázek 7: Sonda osazená čidly, připravená na druhé vypuštění

V den vypouštění (9. 3. 2019) foukal velmi silný vítr s nárazy až $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, který velmi zkomplikoval vypuštění sondy. Jestliže by se jednalo o malé užitečné zatížení a méně nafouknutý balón, nebyl by to žádný problém. Jelikož byla ale má sonda osazená měřícími a záznamovými zařízeními, bylo potřeba balón nafouknout více. Z důvodu velikosti byl velmi snadno stržen větrem a velikost rychlost ve vertikálním směru byla větší než v horizontálním, tudíž sonda nestihla vystoupit do takové výšky, aby se vyhnula keři, který jí stál v cestě. Sondě se bohužel o tento keř zlomil jeden ze tří profilů, díky kterým držela pohromadě. Sonda nicméně držela pohromadě stále a to díky kobercové pásce, kterou byly dřevěné profily obmotány právě z tohoto důvodu. Jednalo se o jedno z vylepšení, které mi Ing. Plaček poradil při naší schůzce.

Mimo problémy s větrem při startu byly problémy i po zbytek cesty. Plánované prasknutí balónu bylo nad městem Měřín, nicméně kvůli velmi silnému větru se balónu nepodařilo

vystoupat tak rychle. Skutečná průměrná velikost rychlosti stoupání byla na základě naměřených dat určena na $3,46 \frac{m}{s}$, což je o $2 \frac{m}{s}$ méně, než bylo vypočítáno předem. Vinou nižší velikosti rychlosti ve vertikálním směru trvalo stoupání do kritické výšky mnohem déle a za tu dobu byl balón větrem unesen mnohem dál. Ve skutečnosti balón praskl přibližně 10 km od Hodonína, místo prasknutí se tedy od původně předpovězeného lišilo přibližně o 120 km. Místo dopadu bylo simulací určeno v okolí Brna, nicméně sonda přistála o 130 km dále, ve slovenské vesnici Horné Chlebany. Trajektorie letu je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Trajektorie letu sondy

Pro sondu jsme jeli s mým vedoucím práce ihned po vypuštění. To, že sonda stoupá mnohem pomaleji jsem v tu dobu nevěděl, tudíž jsem spoléhal na vypočítaná data. Poté, co po sestupu ze stratosféry opět navázala komunikaci a odeslala svou polohu, viděl jsem, že sonda přeletěla slovenské hranice a pohybovala se směrem k Nízkým Tatrám. Jelikož není možné zjistit přesnou hodnotu výšky, nevěděl jsem, v jakém místě Slovenska přistane. Proto jsme se rozhodli na Slovensko nejít a počkat, kam sonda dopadne.

Po půl hodině cesty zpět do Prahy mi přišla zpráva, že sonda dopadla na pole (obr. 9) ve vesnici Horné Chlebany. Jelikož jsme s mým vedoucím již byli na cestě do Prahy, nehodlali jsme pro ni jet. Proto jsme zavolali Ing. Jozefu Ladickému, starostovi této obce, a on byl tak laskav, že nám pro ni následující den ráno zašel. Sondu si vzal k sobě a poslal na adresu školy.



Obrázek 9: Sonda na poli ve vesnici Horné Chlebany

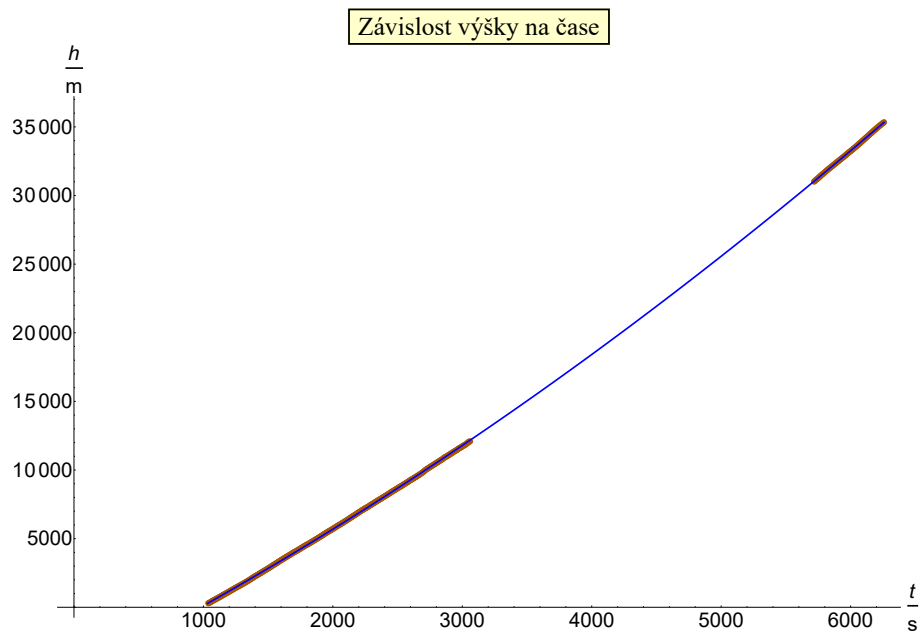
2.6 Zpracování dat

Grafy z naměřených dat jsem vytvářel v programu Wolfram Mathematica, který mi velmi usnadnil práci, jelikož stačí kód napsat jednou a poté jen nahrát soubor s daty, který se ukládá ve formátu CSV a příslušné grafy se vykreslily.

2.6.1 První vypuštění

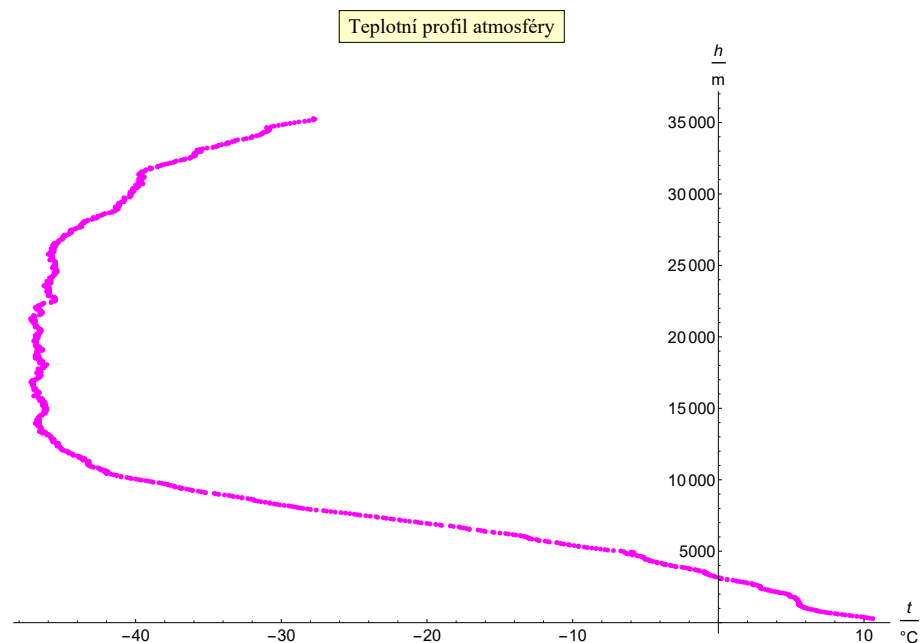
Jak již bylo zmíněno, měření GPS pozice a výšky se přibližně ve 23 km zaseklo, proto je u grafů, kde vystupuje výška, problém s vykreslováním. V částech grafu, kde byla výška měřená přesně, roste s časem kvadraticky. Proto lze získaná data aproximovat kvadratickou funkcí a do grafu naměřených hodnot dat proložit parabolou (graf 2). Dále tedy vyhodnocuji data v závislosti na takto dopočítané výšce.

Předěl mezi vrstvami atmosféry je primárně určen charakteristickými závislostmi teplot na nadmořské výšce. Dle mého měření (graf 3) je gradient poklesu teploty v troposféře $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 100 m. Gradienty byly počítány pomocí krajních bodů úseku mého měření (troposféra, tropopauza atd.), abych se vyhnul chybám způsobených při prolétáváním oblačností. Tento pokles byl konstantní až do výšky 11 km. Od této výšky začala teplota klesat pomaleji, až se dostala na hodnotu $-47,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato teplota byla od 13 km do 25 km



Graf 2: Proložení naměřených hodnot parabolou

nezávislá na výšce, což dle popisu znamená, že se jedná o tropopauzu. Přibližně ve 25 km začala teplota opět růst, až na maximální měřenou teplotu $-27,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (v tomto úseku letu).



Graf 3: Teplotní profil atmosféry ze dne 3. 11. 2018

Další z čidel měřilo atmosférický tlak. Pro výpočet atmosférického tlaku nemůžeme využít rovnici $\Delta p = \rho g \Delta h$, jelikož ta platí pouze pro nestlačitelné kapaliny - hustota se s tlakem mění minimálně. Nicméně v případě plynů se tlak se snižováním sloupce plynu zmenšuje a to exponenciálně, podle rovnice (1):

$$p = p_b \cdot \left[\frac{T_b}{T_b + L \cdot (h - h_b)} \right]^{\frac{g_0 \cdot M}{R \cdot L_b}} \quad (1)$$

kde

p - měřený tlak;

p_b - hydrostatický tlak v hladině b ;

T_b - teplota v hladině b ;

L - gradient změny teploty;

h - nadmořská výška zkoumané hladiny;

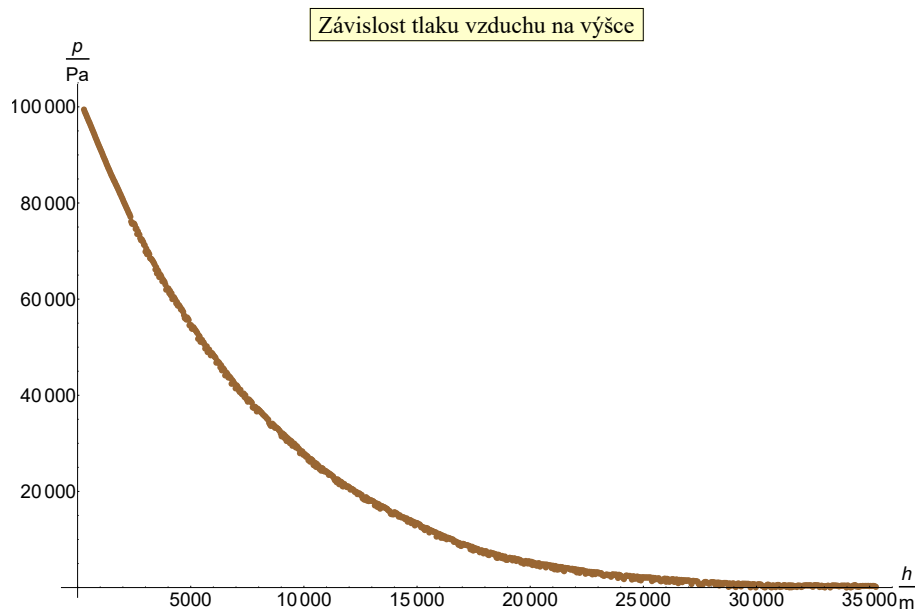
h_b - nadmořská výška hladiny b ;

R - molární plynová konstanta;

M - molární hmotnost vzduchu;

g - velikost tíhového zrychlení.

Tato rovnice popisuje změnu tlaku v závislosti na výšce. V této rovnici je zahrnut i gradient změny teploty, nicméně je brán jako konstanta. Proto nemohu porovnávat mnou naměřený tlak (graf 4) s teoreticky vypočítaným tlakem, jelikož gradient změny teploty L_b se s výškou (resp. s vrstvou atmosféry) mění.

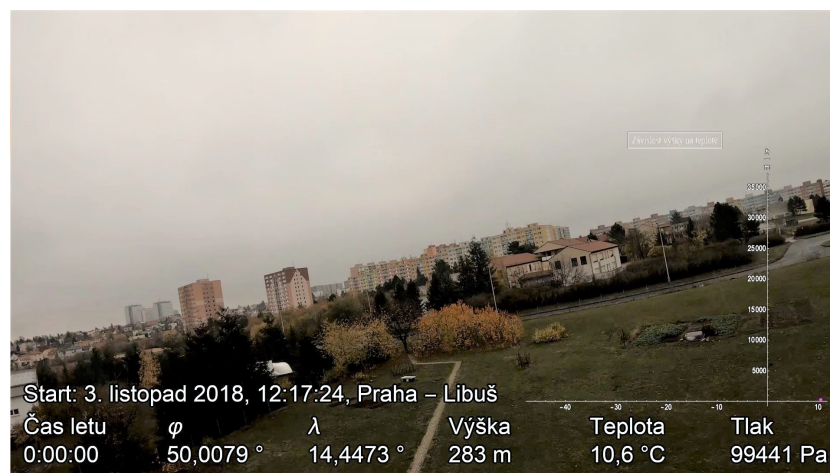


Graf 4: Závislost naměřeného tlaku vzduchu na výšce

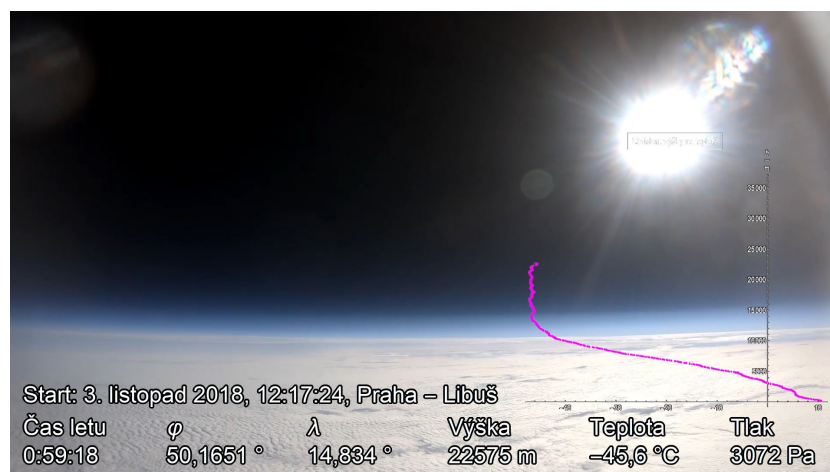
Součástí zaznamenaných dat bylo i video. Nahrávání se nicméně vlivem nízkých teplot ve výšce 27,6 km přerušilo. Z naměřených dat jsem udělal pole hodnot (obr. 10), které jsem následně do videa vložil jako telemetrické údaje - viz obr. 11 a obr. 12.

Start: 3. listopad 2018, 12:17:24, Praha – Libuš					
Čas letu	φ	λ	Výška	Teplota	Tlak
1:09:36	50,1533 °	14,8432 °	27128 m	-44,9 °C	723 Pa

Obrázek 10: Snímek dat vkládaných do videa



Obrázek 11: Přidaná telemetrie do videa

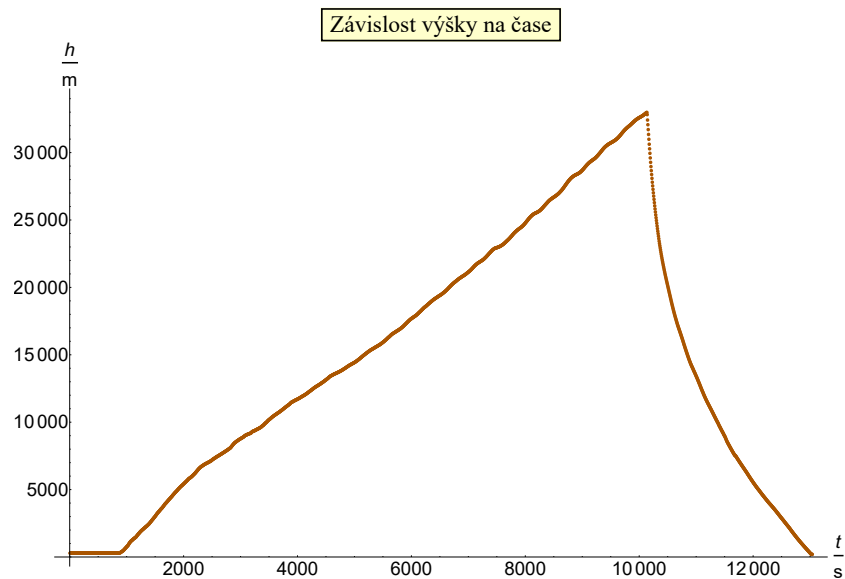


Obrázek 12: Přidaná telemetrie do videa

2.6.2 Druhé vypuštění

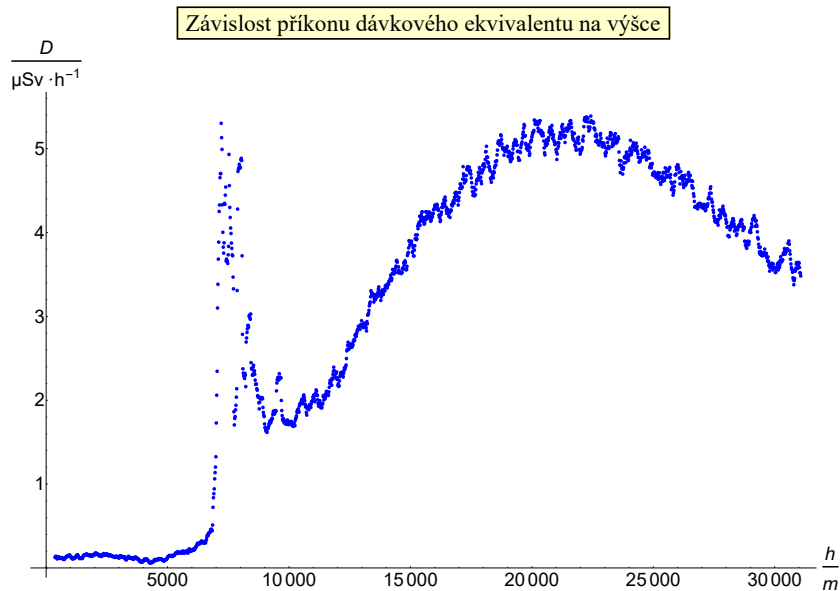
Druhé měření bylo co se týče naměřených hodnot velmi podobné, nicméně vlivem silného větru nejsou naměřená data tak reprezentativní, jako z vypouštění prvního. Z důvodu větší kapacity baterií se zaznamenala všechna data o nadmořské výšce jak z cesty nahoru, tak

z pádu zpět na zemský povrch, proto jsem byl schopen vykreslit graf hodnot z celého letu (graf 5) a ostatní data měnící se v závislosti na výšce jsou tedy v grafech závislá na skutečně naměřené výšce.



Graf 5: Závislost výšky na čase

Na rozdíl od prvního vypuštění byl na palubě sondy přítomen již zmíněný Geigerův-Müllerův počítač pro měření radiace. Před vypuštěním sondy jsem předpokládal, že se radiace bude s výškou zvyšovat, jelikož bude sonda stále méně stíněna zemskou atmosférou proti kosmickému záření. Po vyhodnocení mi vyšel graf 6.



Graf 6: Závislost příkonu dávkového ekvivalentu na výšce

První peak hodnot, který se vyskytl ve výšce od 8 km do 9 km je pravděpodobně způsobený nábojem vytvořeným v oblacích, kterými sonda prolétávala. Tento náboj (obr. 13) je příčinou vzniku blesků, nicméně tvoří se i v ostatních oblakách. Je tedy možné, že byl měřen tento náboj a interpretován jako dávkový ekvivalent.



Obrázek 13: Rozložení nábojů na zemi a v mracích [11]

Radiace ve vyšších vrstvách atmosféry je způsobena sekundárním kosmickým zářením. Částice primárního kosmického záření mají energii přibližně 10 GeV. Při srážce částice kosmického záření s atomem kyslíku nebo dusíku v atmosféře se jádro rozpadne na nukleony (protony a neutrony), mezony, α částice, deuterony a γ částice [10].

Nárůst radiace do výšky 22 km je způsoben stále se tenčící vrstvou atmosféry, která by dokázala zachytit sekundární kosmické záření. Pokles radiace od 22 km výše je způsoben nižší interakcí primárního kosmického záření s vrstvami atmosféry, proto tvorba sekundárního kosmického záření klesá a klesá tedy i hodnota radiace. Nejvyšší interakce tohoto druhu kosmického záření je v tzv. Regener-Pfotzerově výšce cca 22 km. Tato výška se téměř nemění. Nicméně s aktivitou Slunce, resp. v závislosti na vzdálenosti Země od Slunce, se mění schopnost této výškové hladiny absorbovat kosmické záření a tím vyvolat sekundární kosmické záření [12].

3 Závěr

Sestrojil jsem dvě sondy schopné zaznamenávat data a video, které jsem úspěšně vypustil a následně i získal zpět. Naměřená data jsem posléze vyhodnotil a vykreslil do grafů, které se shodují s teoretickým popisem. Ve druhém měření jsem potvrdil přítomnost sekundárního kosmického záření a určil výšku, ve které nabývá maximálních hodnot.

Naměřená data mohou být cennou poučkou např. pro učitele fyziky - mohou potvrdit teoreticky vyučované charakteristiky atmosféry.

Detailnější analýza získaných dat, jejich proložení teoreticky odvozenými znalostmi i pečlivé porovnání s daty naměřenými profesionálními sondami může být námětem další práce.

Seznam použitých značek a symbolů

p - tlak; $[p] = \text{Pa}$ (pascal)

t - teplota; $[t] = ^\circ\text{C}$ (stupeň celsia)

U - napětí; $[U] = \text{V}$ (volt)

I - proud; $[I] = \text{A}$ (ampér)

g - velikost tíhového zrychlení; $[g] = \text{m s}^{-2}$

Seznam obrázků

1	Palubní počítač	5
2	Satelitní sledovač SPOT Trace	6
3	Geiger-Müllerův počítač	7
4	Testování elektroniky	8
5	Vypouštění sondy z observatoře v Libuši	9
6	Snímek těsně před ukončením nahrávání videa ve výšce 27 626 m	10
7	Sonda osazená čidly, připravená na druhé vypuštění	11
8	Trajektorie letu sondy	12
9	Sonda na poli ve vesnici Horné Chlebany	13
10	Snímek dat vkládaných do videa	16
11	Přidaná telemetrie do videa	16
12	Přidaná telemetrie do videa	16
13	Rozložení nábojů na zemi a v mracích [11]	18

Seznam použité literatury a zdrojů informací

Seznam použitých internetových zdrojů

- [1] <https://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/structur.htm>
[cit. 2019-03-16]
- [2] <https://www.atoptics.co.uk/highsky/hmeso.htm> [cit. 2019-03-16]
- [3] <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/assmann-richard> [cit. 2019-03-16]
- [4] <https://www.highaltitudescience.com/pages/tracking-a-weather-balloon> [cit. 2019-03-05]
- [5] https://www.findmespot.com/downloads/SPOT_TRACE_User_Guide.pdf [cit. 2019-03-16]
- [6] <https://news.uns.purdue.edu/images/2012/seagrant-buoy.jpg>
- [7] https://www.branadovesmiru.eu/userfiles/obrazky/odborne/oc_strat_obr01.jpg [cit. 2019-03-16]
- [8] <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477%281992%29073%3C0017%3AARUKHW%3E2.0.CO%3B2> [cit. 2019-03-16]
- [9] <https://pardubice.rozhlas.cz/nejstarsi-meteorologicka-stance-stoji-na-otave-6039726>
[cit. 2019-03-16]
- [10] https://www.wikiskripta.eu/w/Kosmick%C3%A9_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD,_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD_pozad%C3%AD_detektoru
[cit. 2019-03-16]
- [11] <https://www.weather.gov/jetstream/lightning> [cit. 2019-03-16]
- [12] <https://arxiv.org/pdf/1707.00275.pdf> [cit. 2019-03-16]
- [13] <https://www.atoptics.co.uk/highsky/hmeso.htm> [cit. 2019-03-16]
- [14] <https://www.space.com/16595-montgolfiers-first-balloon-flight.html> [cit. 2019-03-25]
- [15] <https://www.scienceabc.com/innovation/what-is-a-geiger-counter-and-how-does-it-work.html>
[cit. 2019-03-25]

Seznam použitého softwaru

1. Microsoft Windows 10
2. Google Chrome
3. Wolfram Mathematica
4. Adobe After Effects CC 2019
5. Adobe Acrobat Reader
6. L^AT_EX
7. Autodesk Autocad 2019
8. PSPad Editor
9. Gopro Fusion Studio
10. Adobe Acrobat Reader