Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

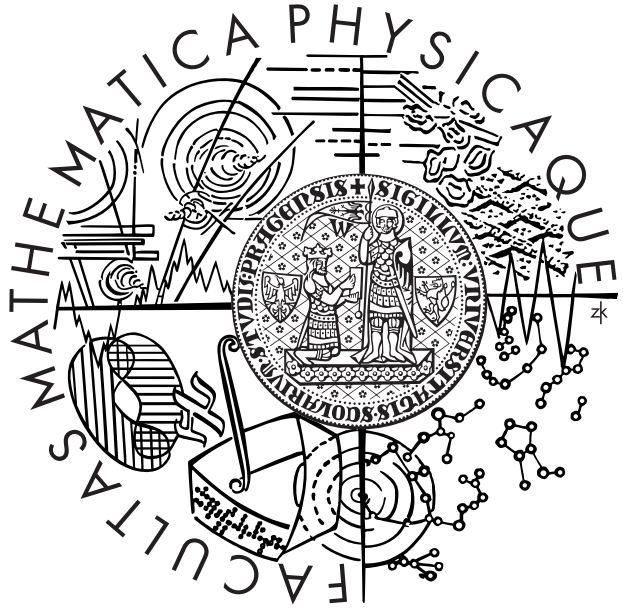
Diplomová práce

2008 Pavol Habuda

Univerzita Karlova v Praze

Matematicko-fyzikální fakulta

Diplomová práce



Pavol Habuda

Záření zakázané kyslíkové čáry ve stopách meteorů

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jiří Borovička, CSc.
Studijní program: Astronomie a astrofyzika

2008

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejněním.

V Praze dne 10. prosince 2008 Pavol Habuda

Poďakovanie

Tým,
ktorí neverili,
nechceli uveriť,
a stále nechcú uveriť.

Musím poďakovať môjmu vedúcemu diplomovej práce, RNDr. Jiřímu Borovičkovi, CSc., za jeho cenné rady a podporu. Ďalej treba poďakovať korektorom: Martinovi Krskovi, Ive Doležalovej, Ladislavovi Bálintovi, Lenke Kopřivovej, Vladimírovi Wagnerovi, Monike Martiniskovej, Adéle Sýkorovej a Miroslavovi Vetríkovi, ktorí trpezlivo hľadali gramatické a typografické chyby. Akokoľvek, za prípadné štylistické, gramatické a typografické chyby zodpovedám ja.

Obsah

1 Úvod **1**
1.1 História zelenej zakázanej čiary 1
1.2 Kde ešte sa môžeme stretnúť s čiarou 557,7 nm 2
1.3 Žiarenie nočnej oblohy 3
1.4 Žiarivý prechod v meteorickej stope 4
1.5 Spektrá meteorov 4
1.6 Zdroje dát 5
2 Dosiaľ publikované práce, týkajúce sa zelenej čiary **7**
2.1 Spektroskopia pomocou televízneho ortikonu 7
2.2 Excitácia metastabilného stavu O I kyslíka v meteoroch 8
2.3 Navrhnuté spôsoby vybudenia atomárneho kyslíka 9
2.4 Zhášanie zelenej čiary 15
3 Redukcia videomateriálu **16**
4 Časové rezy – parabola **30**
4.1 Hľadanie maxima pomocou kvadratického fitu metódou najmenších štvorcov 30
4.2 Program p_par 30
4.3 Generovanie cipher mapy 31
4.4 Analyza R^2 32
4.5 Postup pri analýze výsledkov – analýza všetkých parabol 35
4.6 Porovnanie výsledkov získaných rôznymi postupmi 38
5 Časové rezy – exponenciála **41**
5.1 Porovnanie výsledkov získaných viacerými postupmi 42
5.2 Výsledky časových rezov 43
5.3 Časové rezy – exponenciála + shift 47
5.4 Porovnanie výsledkov programov SHIFT a exp_2 50
5.5 Diskusia s publikovanými prácami 50
6 Integrálna intenzita **54**
6.1 Teoretický tvar závislosti nárastu a poklesu integrálnej intenzity 54
6.2 Hľadanie „ideálnej funkcie“ 54
6.3 Aká je skutočná hodnota y_0? 58
6.4 Program vyska_intenzity 62
6.5 Výsledky analýzy integrálnej intenzity 63
7 Energia uvoľnená v zelenej čiare **75**
7.1 Pogsonova rovnica pre zelenú čiaru 75
7.2 Výpočet integrálnej magnitúdy a energie uvoľnenej v zelenej čiare 75

7.3 Účinnosť premeny kinetickej energie meteoru 77
7.4 Magnitúda meteoru získaná z MIM súboru a meraná zo záznamu spektra 85
8 Bolid 130807 – prípadová štúdia 88
8.1 Integrálna intenzita 88
8.2 Rýchosť nárastu a poklesu intenzty zelenej čiary v závislosti na výške 90
9 Koncentrácia kyslíku O I v meteorickej stope 95
9.1 Základné termodynamické vzťahy 95
9.2 Odhad celkového počtu atómov kyslíka, ktoré žiaria 95
9.3 Efektívny priemer valca zelenej čiary 97
9.4 Rýchlosť expanzie 98
9.5 Porovnanie výsledkov s publikovanými výsledkami 102
10 Záver 105
Literatura 109
Dodatok – Použité formáty súborov 113

Název práce: Záření zakázané kyslíkové čáry ve stopách meteorů
Autor: Pavol Habuda
Katedra: AÚ UK
Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jiří Borovička, CSc.
Email vedoucího: borovic@asu.cas.cz
Abstrakt: Cieľom tejto diplomovej práce bolo štúdium zelenej zakázanej kyslíkovej čiary. Bolo zistené, že zelená čiara žiari prevažne vo výškach 100–110 kilometrov, mimoriadne pod 90 kilometrov. Detailne bola preskúmaná časová závislosť intenzity zelenej čiary v závislosti na výške. Bola navrhnutá teoretická závislosť a overený jej súhlas s napozorovanými dátami. Rovnako bola preskúmaná závislosť integrálnej intenzity na čase. V predchádzajúcich prácach boli navrhnuté mechanizmy excitácie a zhášania zelenej čiary, avšak práce skončili v 70. rokoch minulého storočia. Práca diskutuje tieto teoretické výsledky. Bola diskutovaná účinnosť premeny kinetickej energie meteoroidu na žiarenie zelenej zakázanej čiary. Koncentrácie atomárneho kyslíku boli odhadnuté niekoľkými nezávislými spôsobmi vo výškach, kde žiari zelená čiara.
Klíčová slova: meteor, spektrum meteoru, zelená zakázaná kyslíková čiara

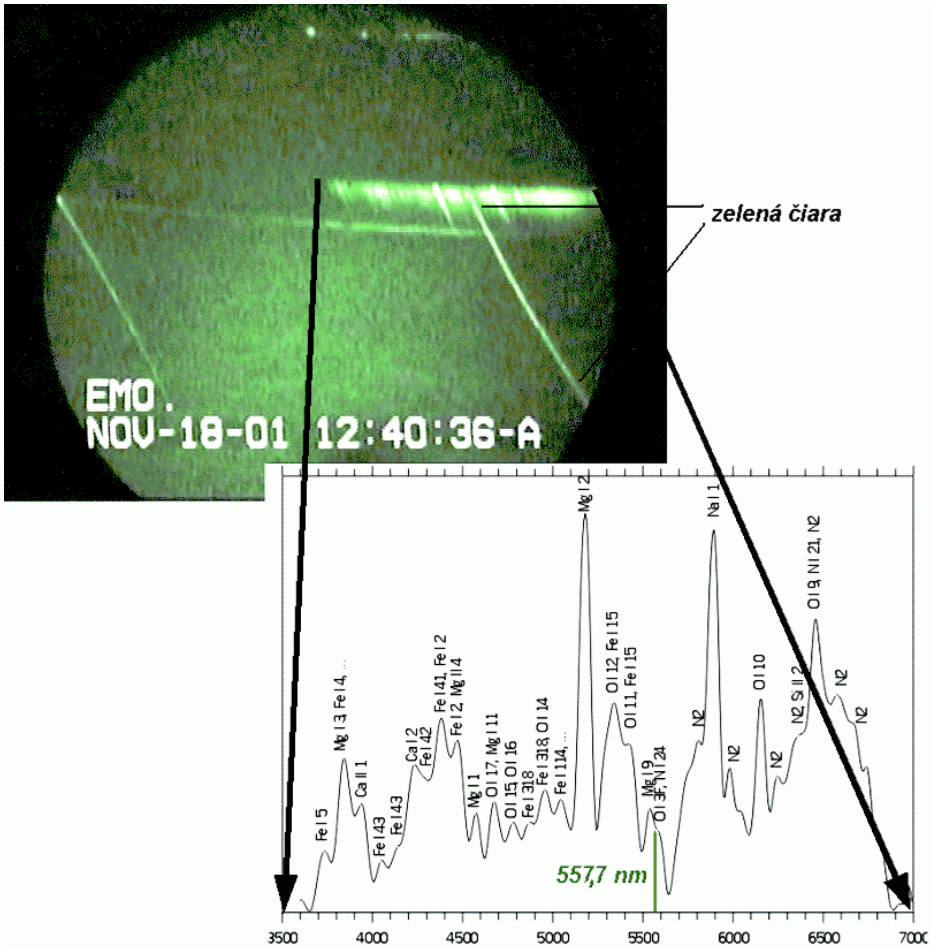
Title: Emission of forbidden green oxygen line in meteor trains
Author: Pavol Habuda
Department: AÚ UK
Supervisor: RNDr. Jiří Borovička, CSc.
Supervisor's email: borovic@asu.cas.cz
Abstract: The aim of this diploma thesis was to study forbidden green oxygen line emission. It was found out that green line emit mainly in heights 100–110 kilometers, exceptionally below 90 kilometers. Time evolution of green line intensity with respect of heights was investigated in detail. There was suggested theoretical dependency and agreement with observed data was fulfilled. Dependency of integral intensity was investigated as well. Mechanisms of excitation and quenching of green line in emission was proposed in previous studies in 70. of previous century. This work discuss with its results. Efficiency of transformation of kinetic energy of meteoroid to forbidden green line's emission was discussed. The concentrations of atomic oxygen was estimated by several way in heights of green line emission.
Keywords: meteor, meteor spectra, forbidden green oxygen line

1 Úvod

V niektorých prípadoch sa mi nepodarilo zistiť slovenské názvy anglických termínov. V tom prípade je termín preložený zväčša prechýlením anglického slova a v zátvorke je uvedený termín pôvodný anglický. Anglický termín je uvedený aj tam, kde by mohlo dôjsť k omylu pri interpretácii slovenského názvu.

1.1 História zelenej zakázanej čiary

Zelená zakázaná čiara kyslíka O I 557,7 nm bola prvýkrát zaznamenaná Campbellom (Bates, 1978) v roku 1895 v spektre žiarenia nočnej oblohy a Slipherom (Slipher, 1919) v roku 1919 v spektre polárnej žiary. Najstaršie práce ju volajú *principal auroral line*, *chief auroral line* či *auroral green line*, pretože je dominantnou čiarou v spektre polárnej žiary. Slipher v uvedenej práci zistil, že spektrum nočnej oblohy obsahuje túto čiaru aj vtedy, keď nie je pozorovaná žiadna polárna žiara. Bolo navrhnutých niekoľko chybných až bizarných vysvetlení pôvodu tejto čiary. Pripisovala sa kryptónu, neznámemu plynu geokoróniu, či dokonca žiareniu pevných dusíkatých častíc. Práce v neskoršom období ukázali, že čiara 557,7 nm patrí molekulárnemu kyslíku (McNaught, 1999).



Obrázok 1 – *Spektrum meteoru a zelenej čiary. Všimnite si, že zelená čiara v spektre metoru chýba.*

V súčasnej dobe väčšina prác hovorí v súvislosti s čiarou 557,7 nm o zelenej zakázanej čiare kyslíka (forbidden [green|oxygen] line). V ďalšom texte budem uvádzať čiaru 557,7 nm ako *kyslíkovú čiaru*.

Objavenie čiary 557,7 nm v spektre meteorov

Zrejme prvou prácou, ktorá zistila prítomnosť zakázanej čiary kyslíka v spektre meteoru bola práca Hallidayova z roku 1958. Halliday (Halliday, 1958) identifikoval čiaru v troch spektrách z 13. augusta 1956 (dve Perzeidy) a 22. apríla 1957 (Lyrida). Zistil, že vo všetkých troch prípadoch to bola prvá čiara meteoru, ktorá začala žiariť, a skončila vo výške, kde ostatné čiary ešte neboli pozorovateľné, alebo len veľmi slabo. Červené čiary kyslíka O I (630,0 a 636,4 nm) v spektre nepozoroval. Dôvod viď strana 11.

1.2 Kde ešte sa môžeme stretnúť s čiarou 557,7 nm

Miest, kde sa môžeme stretnúť s kyslíkovou čiarou, je veľa. V Slnečnej sústave sú to napríklad polárne žiary. Polárna žiara máva predovšetkým dve farby – červenú a zelenú. Červenú čiaru 630,0 nm spôsobuje atmosférický kyslík vo vyšších výškach, našu skúmanú zelenú vo výškach nižších. O žiarení nočnej oblohy si povieme v nasledujúcom bloku. Toto žiarenie bolo pozorované napr. aj na Venuši, kde bola zelená čiara zreteľne pozorovaná ďalekohľadom Keck I (Slanger, 2000). Potom je to napr. dvojica Jupiter–Ió, kde táto čiara vzniká vďaka bombardovaniu povrchu Ió nabitými časticami Jupiterovej magnetosféry (Bouchez, 2000).

V sedemdesiatych rokoch minulého storočia sa začali astronómovia zaoberať aj zelenou čiarou v spektrách komét. U komét čiara vzniká pravdepodobne vďaka fotodisociácii vody a následnej excitácii voľného atomárneho kyslíka. Bola zreteľne viditeľná a jasne detekovaná napr. u komét 153P/Ikeya-Zhang (Capria, 2005), C/1995 O1 Hale-Bopp (Zhang, 2001) a 9P/Tempel 1 (Capria, 2006). U posledne menovanej tesne po impakte sondy Deep Impact na povrch Tempel 1.

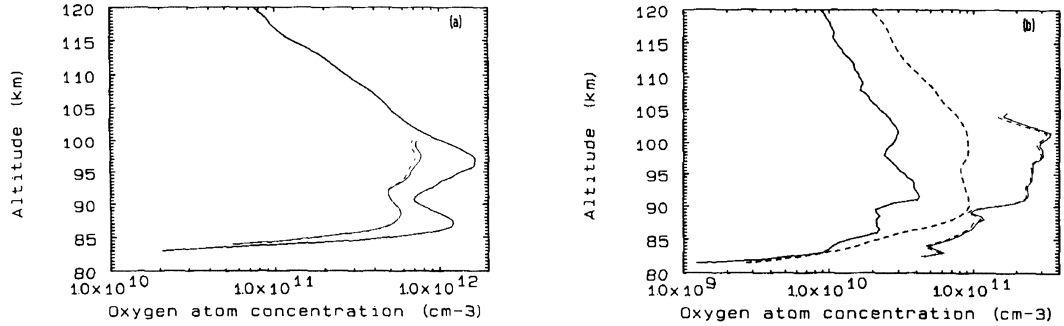
Krásnu zelenú farbu planetárnych hmlovín oceňujú amatérski fotografovia Deep Sky objektov. Ich farba ale nie je dôsledkom čiary 557,7 nm, ale čiary dvakrát ionizovaného kyslíka O III 500,7 nm. Zelenú čiaru u planetárnych hmlovín ale možno pozorovať, napr. v práci (Richer, 1991) bola použitá na určenie teploty prechodnej oblasti (transition zone) niektorých planetárnych hmlovín.

Miest kde sa zelená čiara vyskytuje, je skutočne veľa. Nespomenuli sme si napr. okolie hviezd, novy či supernovy. K jej výskytu potrebujeme podmienky, ktoré nie sú na Zemi (okrem laboratórií a vyššej atmosféry) bežné. Vesmír však ponúka mnoho miest, kde sa zelená čiara môže vyskytnúť. Vyžaduje nízky tlak, prísun energie v ráde elektrónvoltov a atomárny kyslík. Veľmi často je používaná spolu s ďalšími dvoma zakázanými čiarami atomárneho kyslíka – červeného dubletu 630,0 a 636,4 nm. Mechanizmus vzniku zelenej čiary si podrobnejšie popíšeme neskôr, v kapitole 2. Vždy ale mať treba na pamäti, že zelená čiara je prítomná aj v žiarení nočnej oblohy. Spektrum zelenej čiary musí byť teda dostatočne kvalitné – inak by sa mohlo stať, že ju budeme pozorovať u úplne všetkých objektov, dokonca aj u tých kde fyzikálne nemá dôvod existovať. Viď práca (Baldwin, 1996), kde autori ukazujú, že zelená čiara nepochádza z hmloviny v Orióne, ale jej pôvod je omnoho prízemnejší.

1.3 Žiarenie nočnej oblohy

Na pochopenie procesov, ktoré sa vyskytujú počas dosvitu zelenej čiary za meteorom, je vhodné preskúmať ďalšie dva podobné javy. Ako polárna žiara, tak žiarenie nočnej oblohy obsahujú vo svojom spektre zelenú čiaru. Hlbšie pochopenie, v čom sa líšia mechanizmy vzniku všetkých troch procesov, nám pomôže lepšie pochopiť procesy u meteorov. Podstatne väčší význam má *žiarenie nočnej oblohy* (nightglow). Časť tohoto žiarenia pochádza z oblasti 90–100 kilometrov, čo je priamo oblasť, v ktorej žiari aj zelená čiara spôsobená meteorom.

Čiary 557,7 nm, 630,0 nm a 636,4 nm sú všetky úzke, relatívny pomer ich intenzít je $500 : 25 : 3$. Čiara 297 nm nebola spektrograficky pozorovaná (Elvey et. al., 1941) – atmosféra ju neprepustí. Existujú dve vrstvy, v ktorých pozorujeme zelenej čiary v žiarení nočnej oblohy. Jedna oblasť sa nachádza asi 250 ± 80 kilometrov nad povrchom. V tejto oblasti je silné vyžarovanie ako zelenej, tak červenej čiary 630,0 nm. Druhá oblasť je približne vo výškach 90–110 kilometrov. Kulkani v (Bates, 1978) ukázal, že maximum vyžarovania je vo výške 97 ± 2 km.



Graf 1 – *Profil koncentrácie atomárneho kyslíka s výškou podľa (Murtagh, 1990). Koncentrácie sa menia takmer o jeden rád. Rôznymi postupmi dostaneme rôzne hodnoty koncentrácií. Práca diskutuje rozdiely, pričom plná čiara v grafe a) a b) zodpovedá meraniu tou istou výškovou raketou.*

Táto oblasť prispieva k celkovej intenzite žiarenia nočnej oblohy viac ako 90 %. Vyššia oblasť žiari najmä v okolí rovníka, nižšia túto vlastnoť postráda (Hays, 1966).

Pozorovania ukazujú že, zelená čiara v žiarení nočnej oblohy dosahuje svojho maxima tesne po polnoci (Elvey et. al., 1941). Krátkodobé variácie intenzity zelenej čiary sú pravdepodobne spôsobené atmosférickými pochodmi (Shapiro, 1969). Existuje štatisticky významná korelácia medzi silou zelenej čiary a indexmi slnečnej aktivity na dlhodobej škále (v stredných zemepisných šírkach). Rovnako bolo poukázané na významnú sezónnu závislosť (Takahashi, 1984) – maximum nastáva počas leta okolo polnoci, s posunom k ránu počas zimy (jedná o južnú pologuľu, leto je v januári).

Zakázaná čiara O I 6300 a O I 6364 Å

Zakázaný kyslíkový dublet O I 630,0 a 634,4 nm je veľmi dobre viditeľný v spektrách žiarenia nočnej oblohy a polárnych žiarach. Jeho poločas života (lifetime) je však 610 sekúnd, čo je dosť dlho na to, aby bol žiarivý prechod v meteorickej stope potlačený atmosferickým dusíkom, napr. (Baggaley, 1977a).

častica zapríčiňujúca zhášanie	koeficient zhášania [cm^3/s]	Zdroj
O_2	6 ± 3.10^{-11}	Clark and Noxon (1972)
N_2	3.10^{-11}	Hays et. all (1978)
O	$1,7.10^{-9}$	van Zandt (1968)

Tabuľka 1 – *Zhášacie koeficienty, pochádzajúce z práce (Midya, 1994).*

1.4 Žiarivý prechod v meteorickej stope

Ak metastabilný kyslíkový atóm prejde veľkým počtom zrážok s ostatnými časticami plynu, namiesto žiarivého prechodu na spodnú hladinu môžeme očakávať zhášanie tohto stavu. Rušiaci účinok zrážok zapríčiní nežiarivý prechod z metastabilnej hladiny. Prakticky sa to prejaví rovnako, akoby sa skrátila doba života elektrónu na metastabilnej hladine.

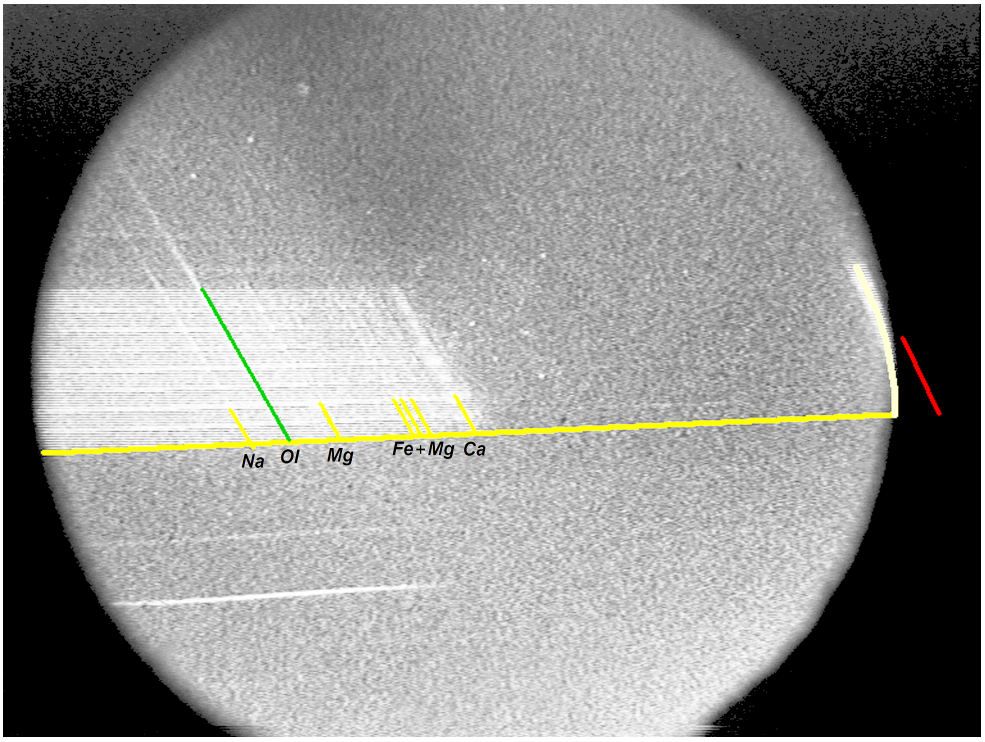
Experimentálne bolo zistené, že pri tlaku nižšom, ako je 1 torr, je zelená čiara silne excitovaná, ale prvý negatívny pás O_2^+ sa javí pri experimente (v laboratóriu) intenzívny. Pri tlaku $p < 0{,}05$ torr je zelená čiara úplne prekrytá týmto pásom. Červená čiara 630,0 nm nebola pozorovaná (McConkey, 1969).

1.5 Spektrá meteorov

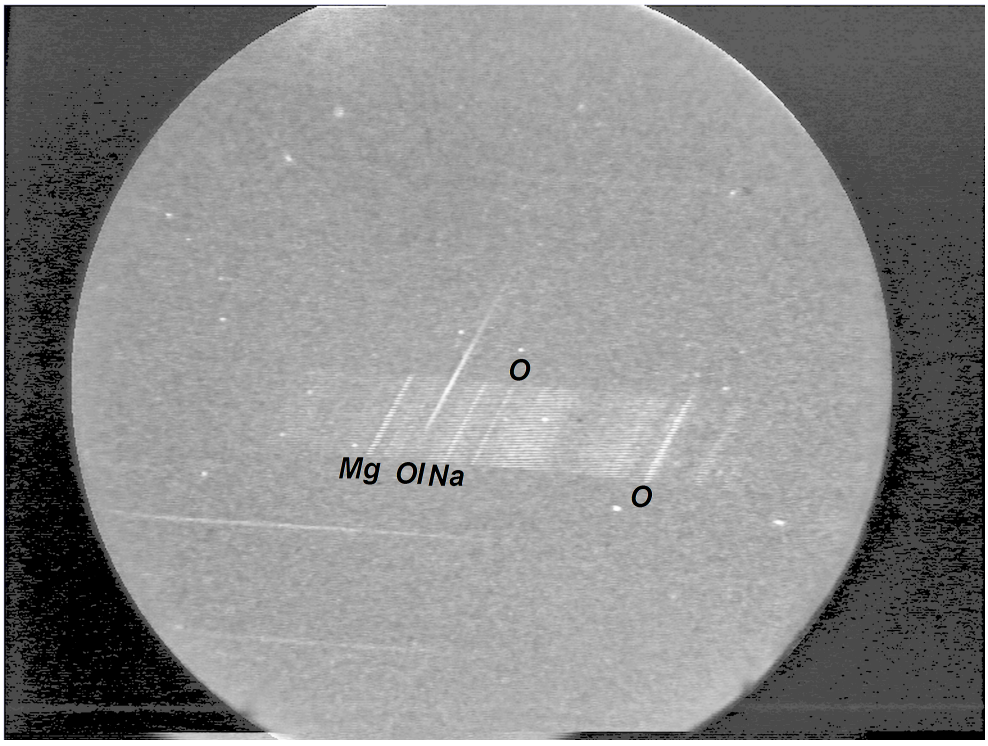
Dve silné spektrá meteorov možno vidieť na obrázkoch 2 a 3. Význačné a silné čiary v spektrách meteorov sú predovšetkým (viď uvedené spektrá)

- Mg – horčíkový triplet 518,36 + 517,27 + 516,73 nm.
- OI – zelená zakázaná čiara, ktorá začína žiariť až po prelete meteoru.
- Na – sodíkový dublet 588,99 + 589,59 nm. Na dublet má excitačnú energiu 2,1 eV voči 5,1 eV u Mg. Na dublet je voči Mg tripletu intenzívnejší pri nižších teplotách (Borovička, 2005).
- O – atomárny kyslík 615,7 nm.
- O – triplet atomárneho kyslíka 777,19 + 777,42 + 777,54 nm. Intenzita atmosférických čiar je podstatne vyššia u rýchlych meteorov (Borovička, 2005), kde je k dispozícii dostatok energie k excitácii.
- Fe + Mg – skupina železa a horčíka s vlnovou dĺžkou okolo 450 nm: Fe 438,3 nm; Mg^+ 448,1 nm a Mg 457,1 nm.
- Ca – vápnikový dublet Ca^+ 393,3 + 396,8 nm. Zodpovedá horúcej zložke (10 000 K) meteorického materiálu (Borovicka, 1999).

Dublety a triplety neboli pri spektroskopickom pozorovaní na Ondřejove rozlíšené. Dôvodom je nízke rozlíšenie spektra. Význačná skupina Fe, Mg má vlnovú dĺžku okolo 380 nm. Leží však na hrane citlivosti, takže je ledva viditeľná. Energia vyžiarená samotným meteoroidom prispieva približne 1/6, žiarenie atmosféry 2/3 a tepelné kontinuum 1/6 pri rýchlych meteoroch (Perzeidy, Leonidy) (Borovička, 2005). U Tauríd sú N a O čiary veľmi slabé a žiarenie atmosféry je produkované takmer výlučne vďaka molekule N_2.



Obrázok 2 – *Čiary viditeľné v spektre meteoru SZ1373 (PER), priemer 4 snímok. Sú označené najsilnejšie spektrálne čiary. Žltou čiatou je označené čelo meteoru. Samotný meteor je vpravo, obraz na kamere je žltej farby a skutočná ploha je označená červenou čiarou. Smer disperzie ukazujú spektrálne čiary – v tomto prípade je* $-60°$*. Silný atmosférický triplet kyslíka* 777 nm *sa nachádza mimo zorné pole.*



Obrázok 3 – *Čiary viditeľné v spektre meteoru SZ1308 (LEO), priemer 4 snímok. Sú označené najsilnejšie spektrálne čiary.*

1.6 Zdroje dát

Dvojstaničné televízne pozorovanie slabých TV meteorov začalo na Ondřejove v roku 1990 (Štork, 2002). Od roku 1997 prebiehajú dvojstaničné pozorovania silných rojov. Pozorovaciu základňu tvoria Ondřejov (14,78 E, 49,91 N, 524 m.n.m.) a Kunžak (15,20 E, 49,11 N, 652 m.n.m.). Vzdialenosť oboch stanovíšť je 92,5 km a azimut Ondřejov–Kunžak je 160° (JJV).

Leonidy 2000 boli pozorované na dvoch stanicich: Curica (2,43 W, 37,86 N, 1007 m. n. m.) a Lucainena de las Torres (2,23 W, 37,04 N, 707 m. n. m.). Dôvodom bola predpokladaná vysoká aktivita roja (McNaught, 1999) a nepriaznivé počasie v polovici novembra v strednej Európe. Vzdialenosť oboch stanovíšť je 92,7 km a azimut 170° (J).

Zaznamenané VHS kazety boli analyzované softwarom MetRec (Molau, 1999) a digitalizované framegrabberom Matrox Meteor II, ktorý je priamo podporovaný uvedeným software. Po uložení do AVI bol každý meteor analyzovaný programom MetPho (Koten & al., 2004) a v prípade identifikácie na oboch staniciach určená jeho priestorová dráha v atmosfére. Rojová príslušnosť bola určovaná Southworth–Hawkinsovým kritériom (Southworth & Hawkins, 1963).

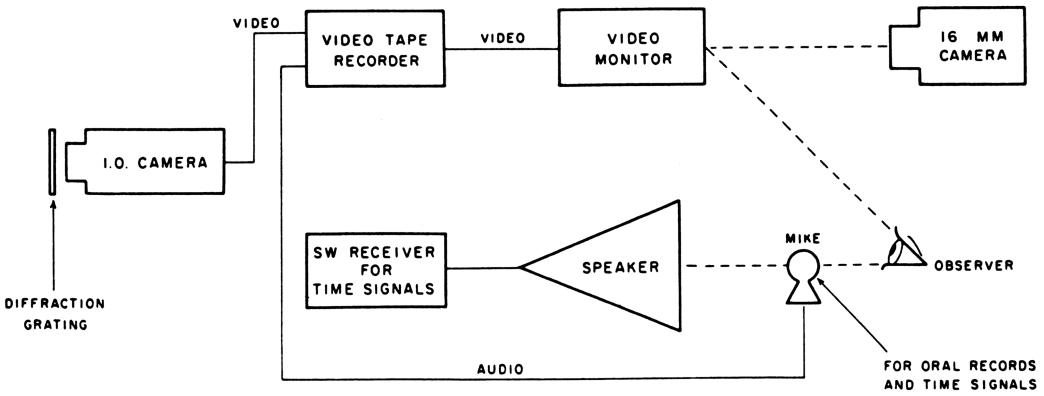
K dispozícii bolo asi 500 spektier, z ktorých bolo do ďalších analýz zvolených 268 takých, ktoré mali vhodnú geometriu a bol predpoklad, že k ním existuje MIM súbor (o typoch súborov, viď Dodatok). Počet záznamov, u ktorých bol k dispozícii bezrozporný MIM súbor a v zornom poli sa nachádzalo badateľné spektrum, bol 239. Ďalších 35 spektier bolo vylúčených z dôvodu, že neobsahovali zelenú čiaru. Výsledných 204 spektier bolo analyzované na integrálnu intenzitu (viď kapitola o integrálnej intenzite), a bolo vylúčených ďalších 23 spektier, na ktorých nebola zelená čiara nájdená a zanechaných 17 spektier, na ktorých mala zelená čiara iba začiatok alebo iba koniec. U ďalších osmich spektrách bol nájdený fit, ktorý bol ale prehlásený za nehodnoverný a spektrum zanechané. Zostávajúcich 156 spektier bolo analyzovaných za účelom nájdenia integrálnej intenzity.

2 Dosiaľ publikované práce, týkajúce sa zelenej čiary

motto: Nesouhlasí-li teorie s přírodou, tím hůře pro přírodu.

2.1 Spektroskopia pomocou televízneho ortikonu

Kanadský tím sústredený okolo Millmana a Hemenwaya zostrojil za účelom pozorovania spektier slabých TV meteorov zariadenie využívajúce televízny ortikon[‡1] (Hemenway, 1971).



Obrázok 4 – *Blokový diagram ortikonu použitého kanadským tímom okolo Millmana. I.O. je skratka pre image orthicon. Prebraté z (Hemenway, 1971).*

Spektrá meteorov boli získane mriežkou Bausch and Lomb s 300 vrypmi/mm, s použitím optickej šošovky f/0,95; 50 mm a televíznej kamery General Electric model 4TE17A1 s televíznym ortikonom GL 7967 a fotokatódou S-20. Kamera používala NTSC televízny systém (prekladaný vyčítavací modus 2 : 1 s 525 riadkami, 30 snímiek za sekundu). Zorné pole malo rozmery $30° \times 22°$.

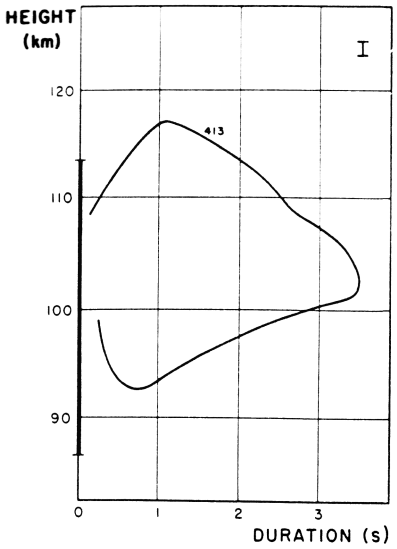
Výstup bol zaznamenávaný na videorekordér. Zároveň bol sledovaný vizuálne a časové značky a komentáre boli vkladané priamo do záznamu. Kalibrácia bola vykonaná pomocou zdroja svetla na kyvadle a bolo zistené, že trvanie (dosvit) signálu závisí na intenzite zdroja a clonovom čísle šošovky. Práve dosvit bol u tohoto zariadenia nepríjemnou komplikáciou. Zistilo sa, že trvanie dosvitu je približne

[‡1] *Ortikon* je starší typ katódovej trubice, používaný napr. v starších farebných televízoroch. Jednalo sa o účinný svetelný zosiľňovač, ktorý bol predchodcom dnešných televíznych vidikonov a CCD čipov. Jeho výhodou bola logaritmická citlivosť na svetlo, v čom sa podobal ľudskému oku. Voči starčím typom trubíc bol citlivejší a odolnejší voči „přeslechom“ (cross-talk), takže dával realistickejší a ostrejší obraz. Viacej viď (URL [3]).

logaritmickou funkciou intenzity pohybujúceho sa zdroja so saturáciou pri veľmi vysokých intenzitách. Na základe toho použili čas, za ktorý signál vyhasol, ako relatívnu mierku intenzít spektrálnych čiar. Kalibrácia bola urobená porovnaním spektra jasného meteoru s referenčným spektrom.

Počas rokov 1968 a 1969 autori zaznamenali počas 141,5 hodiny 156 spektier meteorov. Zelená čiara bola jednou z najvýraznejších čiar, u slabších meteorov často jedinou pozorovateľnou. Ortikon mal jednu podstatnú nevýhodu. Množstvo napozorovaných dát rástlo omnoho rýchlejšie ako množstvo dát spracovaných. V prípade, že by autori dokázali spracovávať dáta rýchlejšie, mohli pracovať s 10krát alebo aj 100krát väčšou vzorkou dát. Výsledky tejto práce mohli byť známe nie teraz, nie pred troma, ale pred tridsiatimi rokmi.

Toto zariadenie ako prvé prinieslo časové rozlíšenie zelenej čiary. Práca (Millman, 1971) priniesla predstavu, ktorá je prvý pohľad nelogická: v istej výške začne zelená čiara žiariť a s časom sa jej viditeľnosť posúva ako smerom nadol, tak nahor. Z pohľadu našej práce je všetko v poriadku – v nižších výškach je nárast intenzity prudší (viď rovnica (8) a graf 21) ako vo výškach vyšších. Čiara vľavo v čase $t = 0$ označuje začiatok a koniec materského meteora. Zelenej čiare trvá vo väčšej výške dlhšie, kým vystúpi z pozadia. Môže sa preto zdať, že začala žiariť skôr v nižšej výške a až potom sa začala „zapaľovať“ smerom nahor.



Obrázok 5 – *Hraničná izofota zelenej čiary podľa (Millman, 1971).*

Skupina okolo Millmana bola zrejme jediná, ktorá sa venovala praktickému výskumu zelenej čiary v spektrách meteorov. Ich praktický výskum skončil koncom sedemdesiatych rokov prácami (Millman, 1975) a (Baggaley & Cummack, 1977), teoretický (Baggaley, 1976a), (Baggaley, 1976b) a (Baggaley, 1977b). Neskôr už neboli publikované ďalšie práce týkajúce sa problematiky.

Dosvit u ortikonu sa podarilo vyriešiť s príchodom CCD čipov (ktoré majú síce nulový polčas dosvitu (half-time decay), ale zasa nenulový vyčítavací čas, v našom prípade pre časovú spektroskopiu nevhodný) a optických zosilňovačov obrazu (image intensifier). Optický zosilňovač obrazu funguje podobne ako ortikon, namiesto vyčítavania elektrónovým lúčom však používa kaskádu niekoľkých fotokatód (GaAs vrstva zabezpečuje, že na jeden zachytený fotón pripadá jeden vyrazený elektrón), ktorá je zakončená fosforeskujúcou doskou. Pôvodne boli zosilňovače obrazu vyvíjané pre armádu, dnes sa používajú napríklad astronómami.

2.2 Excitácia metastabilného stavu O I kyslíka v meteoroch

Prechody v atomárnom obale sú považované za zakázané, ak ich nepovoľuje lineárne priblíženie kvantového popisu elektrónového obalu. Teória povoľuje zmenu

kvantového čísla F iba o ± 1 pri preskoku elektrónu z jednej hladiny na druhú. Ak je zmena F väčšia, hovoríme o *zakázanom prechode*. Takýto prechod má *dobu života* (strednú dobu existencie) elektrónu na metastabilnej hladine o mnoho rádov dlhšiu ako bežný prechod medzi dvoma hladinami. V laboratórnych podmienkach sú excitované elektróny veľmi rýchlo uvedené do základného stavu vďaka zrážkam s okolitými molekulami. Pri týchto zrážkach je energia elektrónu na metastabilnej hladine konvertovaná do energie zrazených atómov. Hovoríme o *zhášaní* (quenching). V prípade, že je tlak plynu nízky a počet zrážok za sekundu klesá, nastáva situácia, keď je doba života elektrónu na metastabilnej hladine porovnateľná alebo nižšia ako stredná doba opustenia metastabilnej hladiny z dôvodu zrážky s molekulou vzduchu. V tom prípade pri opustení hladiny vyžiari elektrón fotón o presne určenej vlnovej dĺžke.

Prechod	λ [nm]	stredná doba života [s]	zdroj
$2p^4\ {}^1D_2 \rightarrow 2p^4\ {}^3P_2$	630,03	196	(Baggaley, 1976a)
$\rightarrow \quad {}^3P_1$	636,39	610	(Baggaley, 1976a)
$2p^4\ {}^1S_0 \rightarrow 2p^4\ {}^3P_1$	297,23	14,9	(Baggaley, 1976a)
$\rightarrow \quad {}^3P_2$	295,84	2 700	(Baggaley, 1976a)
$\rightarrow \quad {}^1D_2$	557,77	0,74	(Baggaley, 1976a)
$3s\ 2p^3\ {}^5S_2^0 \rightarrow 2p^4\ {}^3P_2$	135,56	$7{,}7{\cdot}10^{-4}$	(Baggaley, 1976a)
$\rightarrow \quad {}^3P_1$	135,58	$2{,}5{\cdot}10^{-3}$	(Baggaley, 1976a)

Tabuľka 2 – *Tabuľka zakázaných prechodov O I.*

Tabuľka 2 ukazuje zakázané prechody atomárneho kyslíka. Vďaka dlhým dobám života elektrónu na metastabilnej hladine nebudeme okrem čiary 557,7 nm ostatné čiary pozorovať. Uvedený dublet v UV oblasti tiež nebudeme pozorovať, keďže UV žiarenie pohltí zemská atmosféra pod meteorom.

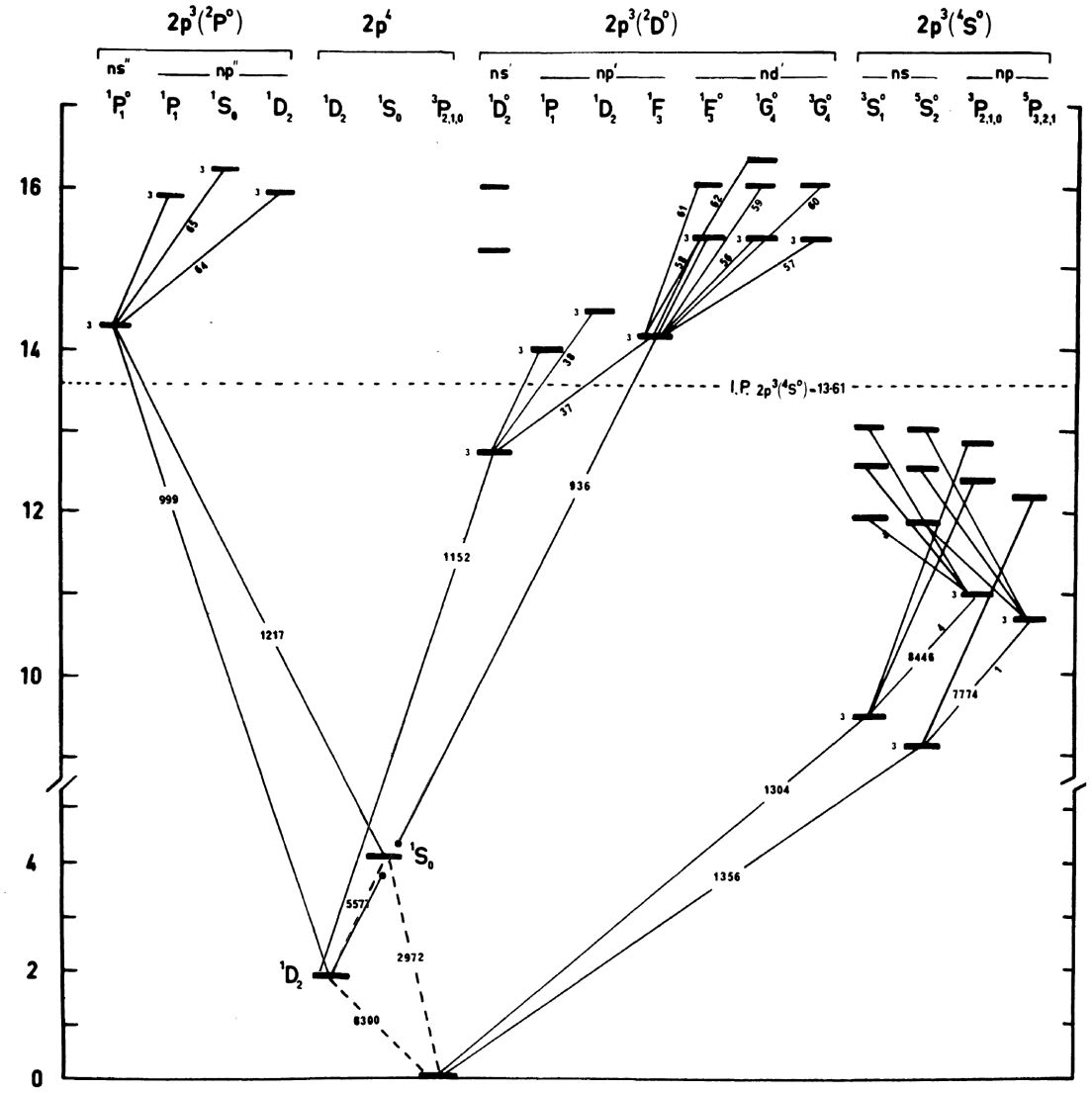
2.3 Navrhnuté spôsoby vybudenia atomárneho kyslíka

Zelená čiara vzniká pri prechode ${}^1S_0 \rightarrow {}^1D_2$. Popíšeme možné mechanizmy excitácie elektrónu na metastabilnú hladinu ${}^1S_0$,[‡2]

Priama tepelná excitácia atómami meteoroidu (1)

Atómy meteoroidu majú kinetickú energiu stoviek eV, ktorú môžu v princípe predať atómu kyslíka. Pozorovania však ukazujú, že aktívny prierez takýchto zrážok je malý. Zelená čiara silne závisí na rýchlosti, čo by našom prípade nemala. Ako pomalé, tak rýchle meteoroidy produkujú atómy s dostatočnou energiou (desiatky eV) na excitáciu elektrónu o 2 eV či 4 eV.

[‡2] V pôvodnej práci (Baggaley, 1976a) bolo uvedených 9 mechanizmov, napriek tomu, že autor tvrdil, že tých mechanizmov je 10 – v skutočnosti vynechal counter (3.4).



Obrázok 6 – *Hladinový diagram atomárneho kyslíka O I. Nie sú uvedené všetky možné prechody. Čiarkovane sú značené zakázané prechody. Horizontálna čiarkovaná čiara označuje ionizačnú hranicu O I. Čísla na čiarach spájajúcich jednotlivé hladiny sú vlnové dĺžky prechodu v ångströmoch. Obrázok je opravený o chybu, ktorá bola v pôvodnom článku (Baggaley, 1976a). Os y je udávaná v elektrónvoltoch.*

V článku (Baggaley, 1976a) je uvedený ešte jeden argument, podľa nášho názoru chybný. Všetky ostatné prechody majú maximum vyžarovania v oblasti maxima žiarenia samotného meteoru. Neznamená to ale, že zelená čiara by tam tiež nemala mať maximum. Samotný prechod $^1\mathrm{S}_0 \rightarrow {}^1\mathrm{D}_2$ je zhášaný zrážkami s okolitými časticami a rovnako maximum koncentrácie atomárneho kyslíka nie je v mieste maxima vyžarovania. Nevieme povedať, čo by sa dialo bez zrážok a nežiarivej deexcitacie.

Prechod kaskádou z vyšších energetických stavov (2)

Multiplet $2p^3(^4S^0)$ je jediný, ktorý je energeticky dostatočne nízko a dostatočne silný. Vo valenčnom systéme však neexistujú prechody (viď obr. 6), cez ktoré by sa elektróny z neho dostali do stavu $2p^4(^1S_0)$.

Iný spôsob ako dostať elektróny na $^1S_0$ hladinu je zo singlet stavu. Jediný povolený prechod zo singlet stavu je z $3s''\ ^1P_1^0$ stavu excitovanej $2p^3(^2P^0)$ hladiny. Táto sa nachádza 0,76 eV nad prvou ionizačnou hladinou O I. Stav $3s''\ ^1P_1^0$ sa však nachádza nad ionizačným limitom a preto časť (zhruba 80 %) elektrónov opustí atóm kyslíka namiesto deexcitácie do stavu $2p^4(^1S_0)$ alebo $2p^4(^1D_2)$. Naviac, žiaden z prechodov na $3s''\ ^1P_1^0$ v excitovanom stave $2P^3(^2P^0)$ nebol nikdy zaznamenaný v spektre meteorov. Prvé dva multiplety teda nemôžu dodávať elektróny na základnú hladinu zelenej čiary.

Ďalšie dva sú prechody zo stavov $3p'\ ^1F_3$ a $3s'\ ^1D_0^2$ do metastabilného $^1D_2$ (koncová hladina zelenej čiary a základná červenej čiary 630,0 nm). Samotný stav $3p'\ ^1F_3$ môže plniť $3s'\ ^1D_0^2$. V spektrách meteorov boli pozorované tri čiary, ktoré plnia práve hladinu $3p'\ ^1F_3$. To naznačuje, že uvedené prechody skutočne prebiehajú. Čiaru 630,0 nm však v spektrách nepozorujeme, pretože doba života hladiny je priliš dlhá na zachytenie dostatočne silného signálu.

Zrážky s uvoľnenými elektrónmi (3)

Ionizujúce zrážky medzi atómami meteoroidu uvoľnenými abláciou a elektrónmi môžu ohriať elektróny o niekoľko eV. Tieto elektróny môžu chladnúť nepružnými zrážkami s atómami, najmä s O_2 a O, a preto excitovať $O(^1S)$. Analýza založená na experimentálnych údajoch ukazuje, že plazma okolo meteoru môže produkovať elektróny s energiou niekoľko eV.

Elektróny s energiami 1–10 eV strácajú svoju energiu prevažne nepružnými zrážkami pri excitácii $O_2(^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\sum_g^+)$, N_2 vibr., $O(^1D)$, $O(^1S)$, $O_2(A^3\sum_u^+)$, $N_2(A^3\sum_u^+)$ a $N_2(B^3\pi_g)$.

Nás zaujíma prechod

$$e + O(^3P) \rightarrow O(^1S) + e\,. \tag{1}$$

Na obrázku 6 vidíme, že na prechod na ^1S potrebujeme 4,18 eV. Proces (1) má najväčší účinný prierez pri 9 eV, a to $\sigma = 2 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Pri tejto energii majú ale ostatné spomenuté spôsoby excitácie atómov a molekúl mnohonásobne väčšie účinné prierezy: $N_2(A^3\sum_u^+)$ a $N_2(B^3\pi_g)$ asi 20krát väčší; triplet O_2 10krát väčší. Objemová hustota molekúl je väčšia ako atomárneho kyslíka, je preto veľmi nepravdepodobné, že tento proces bude mať za následok pozorovateľnú excitáciu $O(^1S)$.

Disociatívna excitácia

$$e + O_2 \rightarrow O + O(^1S) + e \tag{2}$$

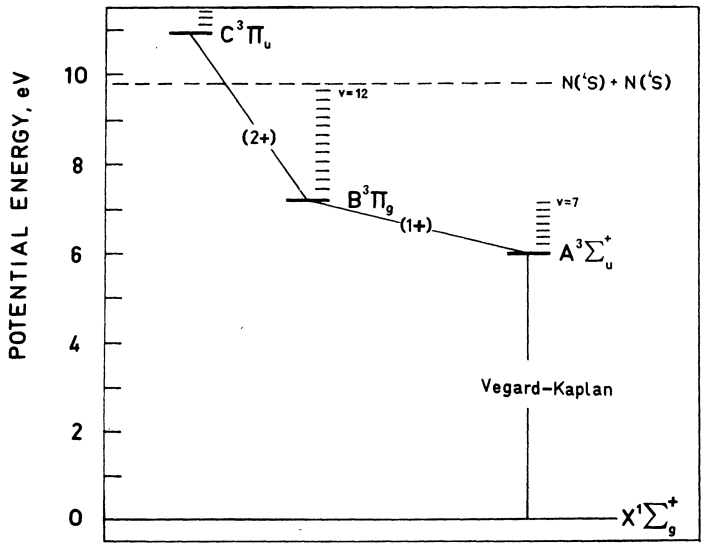
vyžaduje minimálnu energiu 9,29 eV. Je pravdepodobné, že účinný prierez dosiahne iba $10^{-18}\,\mathrm{cm}^2$ pri energiách okolo 25 eV. Objemová elektrónová hustota bude pri týchto energiách zanedbateľná.

Prenos energie z dusíka (4)

Prenos energie z prvého tripletu molekulárneho kyslíka (viď 7)

$$N_2(A^3\sum_u^+) + O(^3P) \rightarrow N_2(X^1\sum_g^-) + O(^1S) + 2{,}0\,\mathrm{eV}$$

bola navrhnutá ako zdroj žiarenia zelenej čiary v polárnej žiare Parkinsonom a Zipfom (Parkinson, 1970). Metastabilný $A^3\sum_u^+$ má dobu života asi 2 sekundy



Obrázok 7 – *Časť hladinového diagramu molekulárneho dusíka* N_2.

a je deaktivovaný zrážkami s molekulami a atómami kyslíka. Meyer v (Meyer, 1969) experimentálne ukázal, že celkové zhášanie $A^3\sum_u^+$ spôsobené $O(^3P)$ má početnosť $5 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$. V skutočnosti iba 5% atómov vyžiari zelenú čiaru, zvyšné atómy boli zhášané.

Pri prelete meteoru atmosférou sú vybudené všetky tri stavy v molekule dusíka N_2. Oba pásové systémy (1+ aj 2+) boli pozorované v spektrách meteorov. Naopak nie je pozorovaný pás Vegard–Kaplan. To naznačuje zhášanie tohoto pásu. Vo výškach pod 90 kilometrov je dominantným zhášačom O_2, nad 90 kilometrov $O(^1S)$. Baggaley v (Baggaley, 1976a) ukázal, že vo výške 100 kilometrov potrebujeme mať asi 15 % všetkých molekúl dusíku N_2 v excitovanom stave prvého tripletu $A^3\sum_u^+$, aby sa pozorovanie zhodovalo s teoretickými intenzitami zelenej čiary. Predpokladom je dĺžková hustota $O(^1S) = 5.10^{14}\,\mathrm{cm}^{-1}$ a počiatočný polomer neutrálnej meteorickej stopy 1 meter. Tento mechanizmus preto vyzeral veľmi zaujímavo pre ďalšiu analýzu.

Staršia práca (Parkinson, 1970) počítala zhášanie $\sum_u^+$. Model počtu častíc $N_2(A^3\sum_u^+)$ v práci nesúhlasí s nami použitým modelom MSIS (Hedin, 1992) (atomárny kyslík súhlasí podstatne lepšie). Vo výške 100 kilometrov je o 30 % nižší a vo výške 120 kilometrov naopak o 30 % vyšší. Rýchlosť poklesu v práci je nižšia ako podľa modelu.

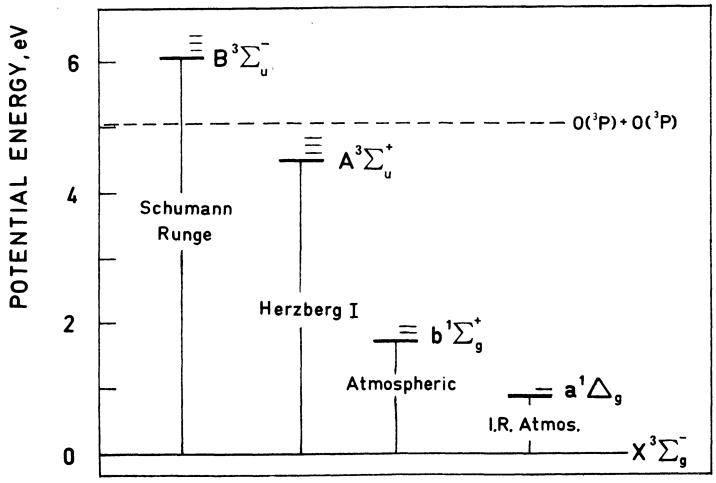
Prenos energie z excitovaného molekulárneho kyslíka (5)

Podobným kandidátom je molekulárny kyslík, konkrétne stav $O_2(A^3\sum_u^+)$. Tento stav je hornou hladinou zakázaného Hertzbergovho spinového pásového systému $O_2(A^3\sigma_u^+) \rightarrow O_2(^3\sum_g^-)$, viď obrázok 8.

Molekulárny kyslík v stave $O(^1S)$ dostaneme procesom

$$O_2(A^3\Sigma_u^+) + O(^3P) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^+) + O(^1S)\,.$$

Úlohu tohto procesu je ťažko odhadnúť, pretože nemáme dobrú znalosť strednej doby života τ. Súčasné odhady hovoria o $\tau \approx 1\,\mathrm{s}$.



Obrázok 8 – *Časť hladinového diagramu molekulárneho kyslíka* O_2.

Hertzbergov systém je význačným rysom žiarenia nočnej oblohy, majúci maximum vo výške 95 km. Pokles intenzity v nižších výškach je pripisovaný zhášaniu atomárnym a ešte nižšie (80 km) molekulárnym kyslíkom. Vo výškach okolo 105 km (maximum zelenej čiary u meteorov) je počet prechodov zhášaním 10-krát väčší ako počet žiarivých prechodov. Ďalej, pásový systém nebol v spektrách meteorov potvrdený. Z toho vyplýva, že tento proces pravdepodobne neprispieva k zelenej čiare.

Chemické reakcie

Chapmanov proces (6)

Prvým spôsobom, ktorý bol navrhnutý na zdroj zelenej zakázanej čiary, bol Chapmanov proces:

$$\mathrm{O}(^3P) + \mathrm{O}(^3P) + \mathrm{O}(^3P) \rightarrow \mathrm{O}_2 + \mathrm{O}(^1S) + 0{,}95\,\mathrm{eV}\,.$$

Chapman ale silne nadhodnotil hustotu častíc v atmosfére. Neskoršie výpočty ukázali, že meteor s jasnosťou -2 magnitúdy produkuje $1{,}7 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{cm}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ atómov. To je o niekoľko rádov menej, než by bolo treba k pozorovaným intenzitám zelenej čiary.

Atomárna výmena v oxide dusnom (7)

Reakcia

$$\mathrm{N}(^4S) + \mathrm{NO}(X^2\pi) \rightarrow \mathrm{N}_2(X^1\Sigma_g^+) + \mathrm{O}(^3P), \mathrm{O}(^1D), \mathrm{O}(^1S)$$

bola navrhnutá ako zdroj zelenej čiary polárnej žiary v oblastiach so zvýšenou koncentráciou NO. Celková rýchlosť tejto reakcie je $2{,}2 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{cm}^3\mathrm{s}^{-1}$. Nočná koncentrácia NO v meteorických výškach je však veľmi nízka. Atómy dusíku môžu byť ešte produkované samotným meteorom v meteorickom stĺpci z molekulárneho dusíka disociatívnou excitáciou alebo nepriamo z molekulárneho dusíka zrážkovou ionizáciou nasledovanou disociatívnou rekombináciou s elektrónmi. Analýza ukazuje, že počet molekúl NO pri úplnej disociácii N_2 je o niekoľko rádov menší, ako by bolo treba pre dĺžkovú hustotu $10^{14}\,\mathrm{cm}^{-1}$ atómov $\mathrm{O}(^1S)$.

Disociácia iónov molekulárneho kyslíka (8)

Počiatočná koncentrácia O_2^+ v meteoroch je neznáma, vie sa ale, že ióny O^+ sú hojne zastúpené. Pravdepodobnosť, že meteorický atóm vyprodukuje voľný elektrón (a teda aj ión) pri strate energie tepelnými zrážkami je pri meteore o rýchlosti 60 km/s asi 0,3 (Sida, 1969). Dĺžková hustota atómov meteoru s jasnosťou $-2{,}5$ magnitúdy je približne $3 \cdot 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-1}$. Následne počiatočná hustota O^+ iónov bude $\alpha_0 \simeq 4 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-1}$. Hoci ióny kovov v meteorickej stope žijú relatívne dlho, O^+ reagujú veľmi rýchlo s okolitou atmosférou a produkujú molekulárne ióny, ktoré následne prechádzajú disociatívnou rekombináciou.

$$\begin{aligned}
O^+ + O &\rightarrow O^+{}_2 + O\,; & 2{,}5 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1} \\
O^+ + N_2 &\rightarrow NO^+ + N\,; & 1{,}5 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1} \\
O_2^+ + e &\rightarrow O + O\,; & 3{,}0 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1} \\
NO^+ + e &\rightarrow N + O\,; & 7{,}0 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}
\end{aligned}$$

Produkcia $O(^1S)$ z NO^+ je spinovo zakázaná, ale výťažnosť produkcie $O(^1S)$ z O_2^+ je 10 %. Relatívne koncentrácie N_2 a O_2 určujú pomer medzi produkciou NO^+ a O^+; 1 : 4 pričom je vo výške 100 km produkcia O_2^+ $50\,\mathrm{s}^{-1}$.

Počiatočná početnosť O_2^+ rekombinácie je približne $10^4\,\mathrm{s}^{-1}$. Vyššieuvedený príspevok tvorí iba zlomok tohto, takže môžeme očakávať, že 12 O^+ iónov bude produkovať 1 $O(^1S)$, čo znamená dĺžkovú hustotu $3{,}3 \cdot 10^{14}\,\mathrm{cm}^{-1}$. Táto hodnota je konzistentná s nameraným odhadom.

Neutralizácia (9)

Prvý mechanizmus zdroja $O(^1S)$ naznačil Halliday v (Halliday, 1958): jednalo sa o rekombináciu iónov

$$N_2^+ + O^- \rightarrow N_2 + O(^1S)\,.$$

Anióny kyslíka môžu vznikať viazaním meteorického elektrónu dvoma mechanizmami. Prvým je radiačný záchyt

$$O + e \rightarrow O^- + h\nu$$

s početnosťou $7{,}0 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$, vďaka ktorému vznikajú O^- ióny s frekvenciou $1{,}9 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}^{-1}$. Druhým je asociatívne pripojenie sa k ozónu

$$e + O_3 \rightarrow O^- + O_2$$

s početnosťou $7{,}0 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$, vďaka ktorému vznikajú O^- ióny s frekvenciou $7{,}0 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{s}^{-1}$.

Tieto pomalé frekvencie kontrastujú s veľmi rýchlym asociatívnym odtrhnutím za prítomnosti atomárneho kyslíka:

$$O^- + O \rightarrow O_2 + e$$

s koeficientom $1{,}9 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$. S rýchlosťou odtrhávania (vo výške 100 km) $190\,\mathrm{s}^{-1}$ nemôže pomer koncentrácií O^-/e presiahnuť $1{,}4 \cdot 10^{-5}$. Keďže disociatívna rekombinácia a neutralizácia majú veľmi podobné početnosti ($\sim 2 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$), akékoľvek N_2^+ v meteorickej plazme budú odstránené procesom

$$N_2^+ + e \rightarrow N + N$$

rýchlosťou 10^5-krát väčšou ako neutralizácia, a v prípade existencie nízkej iónovej koncentrácie rýchlosťou $120\,\mathrm{s}^{-1}$ procesom

$$\mathrm{N}_2^+ + \mathrm{O} \rightarrow \mathrm{NO}^+ + \mathrm{N}$$

s koeficientom $1{,}4 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$. To znamená že neutralizácia bude nastávať so zanedbateľnou rýchlosťou vzniku $\mathrm{O}(^1S)$. Ďalšie procesy ako ambipolárna difúzia a komplexnejšie chemické reakcie nezmenia tento výsledok.

Dvojstupňový kyslíkový mechanizmus (10)

Bates v (Bates, 1988) uvádza ako podstatný zdroj excitácie atomárneho kyslíka v žiarení nočnej oblohy proces

$$O + O + M \rightarrow O_2^* + M$$
$$O_2^* + O \ \rightarrow O_2 + O(^1S)$$

kde M sú spoločne N_2, O_2 a O, pochádzajúce z meteoroidu. $*$ nad zdrojom značí excitovaný stav.

Baggaley v práci (Baggaley, 1978) ďalej naznačuje, že intenzita zelenej čiary je priamo úmerná koncentrácii O^+. To favorizuje tento mechanizmus ako zdroj naplnenia hladiny $\mathrm{O}(^1S_0)$.

2.4 Zhášanie zelenej čiary

Baggaley v (Baggaley, 1976b) navrhol niekoľko mechanizmov zhášania zelenej čiary. Všetky počítali so zrážkovou deaktiváciou hladiny $^1S_0$. Ako zdroje navrhol

- molekulárny kyslík: $\mathrm{O}(^1S_0) + \mathrm{O}_2(^3\sigma_g^-) \rightarrow \mathrm{O}(^3P) + \mathrm{O}_2$,
- atomárny kyslík: $\mathrm{O}(^1S_0) + \mathrm{O}(^3P) \rightarrow 2\mathrm{O}(^3P)$,
- ďalšie neutrálne molekuly: O_3, NO, CO_2, N, N_2,
- elektróny: $\mathrm{O}(^1S_0) + e \rightarrow \mathrm{O}(^3P), \mathrm{O}(^1D) + e$.

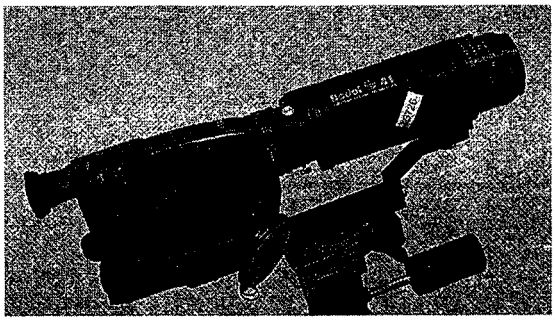
Diskutoval uvedené zdroje a dospel k záveru, že celkový zhášací koeficient záleží na jasnosti meteoru (viď graf 36).

3 Redukcia videomateriálu

Táto časť popíše postup redukcie a spracovania videosúboru. Človek pracujúci s programom RESPEC nájde v tejto časti tipy, ktoré môže neskôr použiť pri redukcii spektier.

Technické vybavenie

Pozorovacie vybavenie sa skladá (v uvedenom poradí) z blejzovanej mriežky (blaze grating) na 550 mm (viď obrázok 10) Miltron Roy so 600 vrypmi/mm, vstupného objektívu Arsat 1.4/50 mm, zosilňovača obrazu (image intensifier) druhej generácie Dedal 41 a bežnej komerčnej videokamery Panasonic NV-S88E (Borovicka, 1999), (Borovička, 2005). Výhodou tejto kamery je, že všetky „vylepšenia“ obrazu sa dajú vypnúť a kamera nerobí žiadne dodatočné modifikácie



Obrázok 9 – *Kamera s pripojeným zosiľňovačom obrazu Dedal 41, prebraté z (Štork, 2002)*

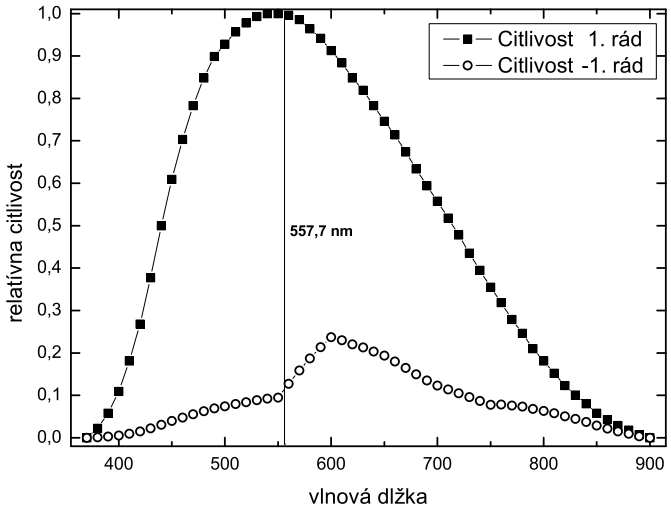
signálu. Výstupné dáta teda neprechádzajú korekciou obrazu. Signál sa ďalej analógovo zaznamenáva na S-VHS pásku. Záznam je pomocou framegrabbera[‡3] Micro DC-30 prevedený do digitálnej podoby. Tá je analyzovaná a snímky, na ktorých sú meteory, resp. spektrá, uložené nekomprimovane do kontajneru AVI s rozlíšením 468×576 obrazových bodov. Zorné pole je kruhové s priemerom 25°. Záznam však kruhový nie je, ale je mierne orezaný na vrchnej a spodnej strane kruhového poľa. Pri obvyklej ohniskovej dĺžke má záznam rozlíšenie $2'$/pix. To dáva priestorové rozlíšenie 60 metrov vo vzdialenosti 100 kilometrov. môžeme povedať, že pre väčšinu meteorov sa priestorové rozlíšenie okolia dráhy pohybuje pod 100 metrov.

Mriežka má blejzovaný +1. rád.[‡4] V neblejzovanom smere má citlivosť 10% pri 550nm (voči +1. rádu), viď obrázok 10. Spektier v −1. ráde je minimum, vďaka

[‡3] Framegrabber je AD/DA prevodník, ktorý prevádza analógový TV záznam do digitálnej podoby.

[‡4] Blejzovaná mriežka je špeciálny typ difrakčnej mriežky. Pri špecifikovanej vlnovej dĺžke má takmer 100% priepustnosť. Na rozdiel od bežných mriežok boli vrypy vyryté takým spôsobom, že sú v pravom uhle voči tzv. blejzovému uhlu (blaze angle). Blejzový uhol je uhlová vzdialenosť od normálového vektoru difrakcie (URL [1]).

geometrickej orientácii oboch kamier pre záznam dráhy meteoru a spektrálnej kamery. Z tohoto dôvodu a dôvodu nízkej citlivosti neboli použité iné spektrá ako v +1. ráde. Vďaka geometrii neboli zaznamenávané ani spektrá vyšších rádov.



Obrázok 10 – *Spektrálna citlivosť použitej mriežky Miltron Roy.*

Kamera je citlivá v spektrálnom rozsahu 380–880 nm. Maximum citlivosti leží pri 550 nm. Najslabšie zaznamenateľné spektrá patria meteorom s jasnosťou 3–4 magnitúdy. Rozlíšenie celej aparatúry je 1,1 nm/pix.

Táto zostava bola prvýkrát použitá v roku 1998 pri pozorovacej kampani zameranej na Orionidy.

Program RESPEC a formát videosúboru

Na redukciu spektier je určený program RESPEC, stále vyvíjaný J. Borovičkom. Je to single-user program, určený len špecifickému okruhu uživateľov. Program používa obmedzené množstvo ľudí – niektoré funkcie iba jeden alebo dvaja užívatelia. Práve tieto funkcie nie sú plne odladené. Za cenu väčšieho množstva chýb poskytuje uživateľovi možnosť podieľať sa na návrhu a funkcionalite programu.

Pracuje s neupravovaným videom, uloženým v kontajneri AVI: Rozlíšenie videa je 768×576 obrazových bodov, 8-bitová farebná hĺbka v odtieňoch sivej so snímkovacou frekvenciou 25 fps. To dáva dátový tok 10 800 kB/s. Kamera používa systém PAL.

Takéto video sa dá bezstratovo skomprimovať na 30–50% pôvodnej veľkosti (tri náhodne vybrané súbory boli skomprimované programom Compressia 0.98 beta na 34%, 49% a 37%). RESPEC využíva DBOS, čo je runtime prostredie prekladača Salford FORTRAN. V čase, keď boli fortranovské knižnice písané, počítače neboli dostatočne rýchle, aby dokázali v reálnom čase dekomprimovať video. To je jeden z dôvodov, program pracuje s nekomprimovaným AVI. Runtime prostredie DBOS priamo nemá podporu funkcií, ktoré by pracovali s komprimovaným videom. Komprimované video by malo tú výhodu, že beh celého programu by sa

znateľne urýchlil. Úzkym hrdlom pri načítavaní dát do pamäte je predovšetkým prístup na disk – DOS pristupuje k disku v PIO móde.

Načítanie AVI súboru programom RESPEC

Program RESPEC sa snaží pri svojom behu nahrať do pamäte čo najviac dát z pevného disku. Do pamäte pristupuje procesor omnoho rýchlejšie ako na disk, má veľmi malú latenciu. Taktiež rýchlosť čítania z pamäte je omnoho vyššia ako rýchlosť čítania z pevného disku. Je preto vhodné použiť počítač s veľkou operačnou pamäťou.

Prvá vec, ktorú treba vykonať, je vložiť do RSP súboru dátum a čas preletu meteoru (s presnosťou na sekundy). Rovnako treba vložiť aj pozorovaciu stanicu (resp. jeho zemepisné súradnice). Použité spektrá boli získané na dvoch staniciach: Leonidy 2000 v španielskej Lucainene a zvyšné meteory na Ondřejove.

Po načítaní videosúboru je ako prvý krok často rozumné natiahnuť dáta z predchádzajúcej redukcie a s nimi ďalej pracovať. Kamera počas pozorovania je stále nasmerovaná na rovnaké miesto na oblohe (v obzorníkovej súradnej sústave). RESPEC vie z rozdielu časov dvoch meteorov vypočítať zmenu súradníc (rektascenzia, deklinácia; RA, DEC) stredu poľa, kam v danom okamihu mieri kamera. Redukcia hviezd je potom značne zjednodušená. Hviezdy z katalógu sa nachádzajú blízko skutočných hviezd a stačí mierne doladiť polohu. Netreba hľadať orientačné hviezdy, čo ušetrí veľa času pri redukcii.

Flatfield a tmavý prúd (dark)

Ak chceme zistiť absolútne hodnoty jasnosti meteoru, nutne musíme urobiť flatfield a dark field. RESPEC predpokladá konštantný tmavý prúd. Od signálu každého obrazového bodu (pixel) sa preto odčíta hodnota 24 (staršie pozorovania), resp. 20 (novšie pozorovania). Je to vďaka odlišnému frame-grabberu, digitalizácia prebiehala na odlišnej karte.

Pole kamery je kruhové, ale PAL špecifikácia pracuje s obdĺžnikom 768×576 obrazových bodov. Preto je nutné, aby sme definovali kruhové pole, na ktoré môžeme potom aplikovať flatfield. Následne je použitá procedúra, ktorá urobí medián z prvých siedmich snímkov.[‡5] Tento medián slúži ako pozaďový snímok. Digitalizácia záznamu bola urobená tak, aby meteor začínal až na ôsmej snímke. Flatfieldy boli robené raz za rok až dva roky, počas súmraku. Niektoré spektrá sú horšej kvality, pretože k nim neexistuje vhodný flatfield. Na redukovanom obraze sú po aplikácii flatfieldu stále vidno jasnejšie a tmavšie plochy.

Slabé meteory občas začínajú skôr ako by sme očakávali – na 6. alebo 7. snímke. Jedná sa vždy o slabé meteory. Zelená čiara u týchto slabých meteorov začína niekedy žiariť už na počiatočných snímkach. Slabé spektrá preto trpia systematickou chybou, nižšími intenzitami vo väčších výškach.

Identifikácia hviezd

Program RESPEC má zabudovaný algoritmus, ktorý nájde zjasnenia v obraze. Vo väčšine prípadov sú to hviezdy. Niektoré zjasnenia sú ale náhodného pôvodu

[‡5] Pri Poissonovom rozdelení je rozdiel medzi mediánom a strednou (mean) hodnotou približne 1/6. Za cenu toho, že reálny signál bude o 1/6 nižší ako nami určený, odstránime rôzne horúce obrazové body (pixely) a „uletené“ hodnoty.

– najmä ak ich algoritmus hľadá na obraze s vysokým šumom s nízkym prahom detekcie zjasnenia. Stredná amplitúda šumu závisí na počte snímiek úmerne $1/\sqrt{N}$. Ak chceme znížiť šum na najmenšiu vhodnú mieru, je treba použiť čo najviac snímok. Vieme, že prvých 7 snímok neobsahuje meteor. Môžeme použiť tie, ako to doporučuje štandardný postup podľa uživateľského manuálu (Borovička, J. a kol., 2008). Existuje ale ešte jeden interval, počas ktorého nám v poli neletí žiaden jasný meteor: dosvit zelenej čiary. Nami doporučovaný postup nájde poslednú snímku, na ktorej je ešte vidieť kontinuum spektra meteoru, a za touto snímkou počíta medián až do poslednej snímky. Počet snímiek je rádovo desiatky. Šum teda znížime niekoľkonásobne.

Porovnanie obrázkov 13 a 14 ukazuje zníženie šumu, ak zvýšime počet snímiek 10-krát. Červeným krížikom sú označené polohy nájdených zjasnení, žltým teoretické polohy hviezd podľa katalógu. Pri rovnakom nastavení kvality parametrov našiel algoritmus 2-krát viacej hviezd. Porovnajte v oboch obrázkoch hodnotu sigma v stĺpci parametrov vľavo. V tomto prípade by bola aj identifikácia na prvých 7 snímkach dostatočne presná.

Okrem väčšieho počtu hviezd získame aj väčšiu presnosť v určení magnitúd referenčných hviezd, viď časť Určenie jasu pozadia na strane 22.

Redukcia polohy

Ak chceme určiť polohu telesa v priestore, musíme zistiť tri súradnice daného telesa. Pretože pri TV zázname chýba tretí údaj o polohe – vzdialenosť od pozorovateľa – musíme použiť nejaký dvojrozmerný popis polohy. Na určenie priestorovej dráhy stačia pozorovania z dvoch navzájom rôznych miest. Pre daný meteor máme $2 + 2$ súradnice, čo je viacej ako 3. To znamená, že jeden údaj je redundantný, a môžeme rátať s chybami merania, aby sme určili dráhu v priestore presnejšie. Ak by sme mali záznam dvoch rôznych meteorov, tak veľmi rýchlo zistíme, že záznamy z oboch staníc popisujú dva fyzicky rôzne meteory, nie jeden spoločný.

V astronómii sa osvedčila sférická geometria, v ktorej postulujeme, že objekt sa nachádza na povrchu sféry. Tá dobre popisuje objekty, ktoré sú zdanlivo v nekonečne. Popis polôh meteoru sa robí v ekvatoreálnej súradnej sústave II. typu (rektascenzia, deklinácia). V tejto sústave polohy hviezd nezávisia na čase. Ak určíme polohu meteoru v tejto sústave, nemusíme ďalej vôbec uvažovať čas. Zo skúsenosti vieme, že statické problémy sa riešia lepšie ako problémy dynamické.

Budeme teda používať ekvatoreálnu sústavu a určovať rektascenziu a deklináciu polohy meteoru. Pri jej určovaní sa musíme orientovať podľa hviezd na TV zázname. Je nutné porovnať záznam s hviezdnou oblohou, spočítanou a vykreslenou podľa teoretických polôh v katalógu. Pre naše účely nepotrebujeme žiaden FK katalóg, vystačíme si takmer s každým, ktorý má správne ekvinokcium. Program RESPEC používa BSC katalóg so správnym ekvinokciom 2000.0.

Nasleduje popis algoritmu, pomocou ktorého nájdeme najlepší fit medzi polohami hviezd na TV zázname a v katalógu. Program pri redukcii nad samotné video vykreslí ďalšiu vrstvu (nazvime ju *katalógovú*). Na ňu umiestni hviezdy z katalógu, polohy ktorých pozná. Pre prehľadnosť používa zaužívaný systém, keď jasnejšie hviezdy sú zobrazené väčšími kružnicami. Samotná redukcia spo-

číva v natočení a zväčšení/zmenšení polomeru krivosti (pracujeme so sférou) tejto vrstvy tak, aby hviezdy v oboch vrstvách mali takmer rovnaké súradnice.

V zázname o spektre je vždy uvedená najjasnejšia hviezda v poli. Občas je jednoduché zistiť, ktorá to je. Občas je to zložitejšie, najmä ak je najjasnejšia hviezda slabá a v poli sa nachádzajú viaceré hviezdy podobnej jasnosti. Potom nezostáva nič iné, ako postupne skúšať všetky hviezdy, ktoré by pripadali do úvahy. V tom najhoršom prípade sa stáva, že uvedená najjasnejšia hviezda je tesne mimo zorné pole. V tomto okamihu je to už len otázkou šikovnosti a skúsenosti, ako človek nájde správne pole. Existuje veľa trikov, ako správne identifikovať hviezdy v poli. Tie, ktoré je možné použiť častejšie, uvedieme:

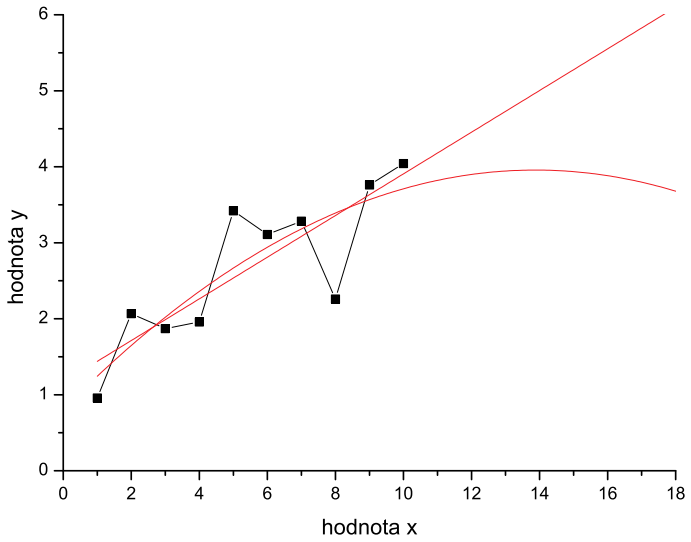
- Ak je kúsok za okrajom veľmi jasná hviezda, potom jej spektrum zasahuje do zorného poľa kamery. Je preto možné orientovať sa podľa tohto spektra. Pokiaľ sa pole nastaví tak, že jasná hviezda vrhá do zornho poľa spektrum, postupným spresňovaním natočenia poľa a zväčšenia rozoznáme zodpovedajúce dvojice hviezd v zornom poli TV záznamu a na katalógovej vrstve.
- Zorné pole kamery je pomerne malé, napriek tomu sa v poli často vyskytnú výrazné skupiny hviezd. Podľa týchto skupín sa dá pomerne jednoducho orientovať. Príkladom môže byť súhvezdie Delfín a Šíp, Plejády, hviezdokopa χ a h Persei, okolie β Pegasi, hlava Draka apod. U tohoto postupu veľmi záleží na znalosti oblohy operátora. Dobrá znalosť oblohy ešte nezaručuje, že tento postup povedie k cieľu.
- Odporúčaný, postup pracuje s prvými siedmimi snímkami. V prípade, že sa použijú a spriemerujú všetky snímky záznamu (ktorých býva u dlhotrvajúcich stôp aj viac ako 50), je získané hladšie pole s menším šumom. V ňom vyniknú aj slabšie hviezdy a je možné rozpoznať pole, ktoré nebolo predtým rozoznané.

Spektrá meteorov boli získavané počas kampaní zameraných na silné roje. Bežne bolo zaznamenaných niekoľko spektier počas niekoľkých po sebe nasledujúcich nocí. Počas noci sa s kamerou zväčša nehýbalo, takže ukazovala na to isté miesto v horizontálnych súradniciach. Ak poznáme stred poľa kamery v okamihu preletu jedného meteoru a čas preletu druhého, môžeme jednoducho dopočítať stred poľa aj pre druhý meteor. V RESPECu bol tento postup implementovaný. Ak je redukciu predchádzajúceho meteoru nahraná na začiatku spracovania ďalšieho meteoru, program dokáže z rozdielu časov spočítať polohu, na aké súradnice (RA, DEC) bola kamera namierená v okamihu preletu druhého meteoru. Potom už stačí len mierne doladiť polohu poľa, aby katalógová vrstva sedela s TV záznamom. Redukcia polohy sa tým podstatne urýchli.

Ak máme zladené polohy hviezd s katalógovou vrstvou, môžeme pristúpiť k samotnej identifikácii hviezd v zázname s katalógovými polohami. Konkrétny postup viď (Borovička, J. a kol., 2008). Pri redukcii môžeme použiť dve metódy: lineárnu a vyššieho rádu. Lineárna nepočíta s distorziou poľa – používa gnomonickú projekciu. Ak počítame σ^2 odchýlok teoretických a skutočných polôh hviezd, lineárny fit obyčajne vychádza 2-krát horšie ako fit kvadratický. Zdalo by sa, že kvadratický fit je logicky výhodnejší. Nie je to tak – v praxi sa ukazuje že nižšia σ^2 nemusí nutne znamenať lepší fit. Dôvodom je spôsob určenia polohy

spektra. Kvadratický fit je nevhodný, ak je k dispozícii málo hviezd pre redukciu polohy. Rovnako v prípade chybne určenej polohy hviezdy môže kvadratický fit nesprávne redukovať pole, ak táto chybná hviezda nemá vo svojom okolí iné hviezdy.

U spektier s nízkym počtom snímok je rozumné pozrieť si spriemerované snímky a doplniť hviezdy, ktoré algoritmus nenašiel. Rovnako treba odstrániť hviezdy, ktoré nie sú skutočné – spôsobené napr. zjasnením v spektre meteoru. U veľmi jasných meteorov (presnejšie spektier, ktoré majú veľký počet snímok, zhruba 70 a viacej) netreba hľadať ďalšie hviezdy ručne. Algoritmus nájde takmer všetky. Nenájdené hviezdy, ktoré sú jasne viditeľné, sú väčšinou slabé červené hviezdy, ktoré sa v katalógu vôbec nenachádzajú.



Graf 2 – *K bodom na priamke bol pridaný náhodný rozptyl s gaussovským a rovnomerným rozdelením. Získaným datasetom bol vedený lineárny a kvadratický fit. Kvadratický fit má nižší súčet štvorcov σ^2. Všimnite si, že kvadratický fit lepšie popisuje polohy hviezd v hviezdnom poli. Naopak, keď sa začneme pohybovať mimo pole, odchýlka kvadratického fitu prudko rastie. Chyba v určení polohy meteoru rastie v prípade lineárneho fitu lineárne, v prípade kvadratického s druhou mocninou. Nie je jednoduché určiť, ktorý postup dáva presnejšie výsledky. Ak je meteor ďaleko od stredu poľa TV záznamu, môže byť výhodnejšie použiť lineárny fit napriek tomu, že kvadratický lepšie popisuje zorné zorné pole.*

Určenie polohy čela spektra je dôležité pre výpočet jeho skutočnej výšky. Na obrazovke sa zobrazí teoretické spektrum a známe čiary preložia cez seba. Poloha čiar na TV zázname je voči teoretickému spektru posunutá. Môže za to sklenutie poľa, pootočenie letu meteoru voči spočítanému smeru, zlé natočenie mriežky apod. Spektrá majúce veľkú chybu polohy čiar voči teoretickej polohe sú z ďalšieho spracovania vylúčené. Skutočná poloha spektra (s ktorou ďalej pracujú rutiny RESPECu) sa počíta tak, že z odhadnutej polohy čela spektra program určí polohu 0. rádu, teda polohu samotného meteoru. Pre viaceré snímky týmito polohami preloží fit, podľa ktorého potom zobrazuje polohu predpokladaného spektra.

Nultý rád (meteor) je väčšinou mimo zorné pole. V praxi bol preto použitý kvadratický fit s tým, že v prípade veľkého rozdielu medzi výsledkami oboch fitov bol lineárny fit akceptovaný, ak dával preukázateľne lepšie výsledky.

Určenie jasu pozadia (MHV)

MHV (medzná hviezdna veľkosť) je hodnota, ktorá určuje jas pozadia (kvalitu) oblohy. Je definovaná ako jasnosť najslabšej viditeľnej hviezdy. Vizuálne sa bežne určuje tak, že pozorovateľ pozerá na hviezdu 5 sekúnd niekoľkokrát opakovane. Hviezda má jasnosť rovnakú ako MHV vtedy, ak ju vidí v 50% prípadov. MHV je závislá na množstve aerosolov, vodnej pary, iných zdrojov extinkcie a taktiež na účinnosti detektora.‡6

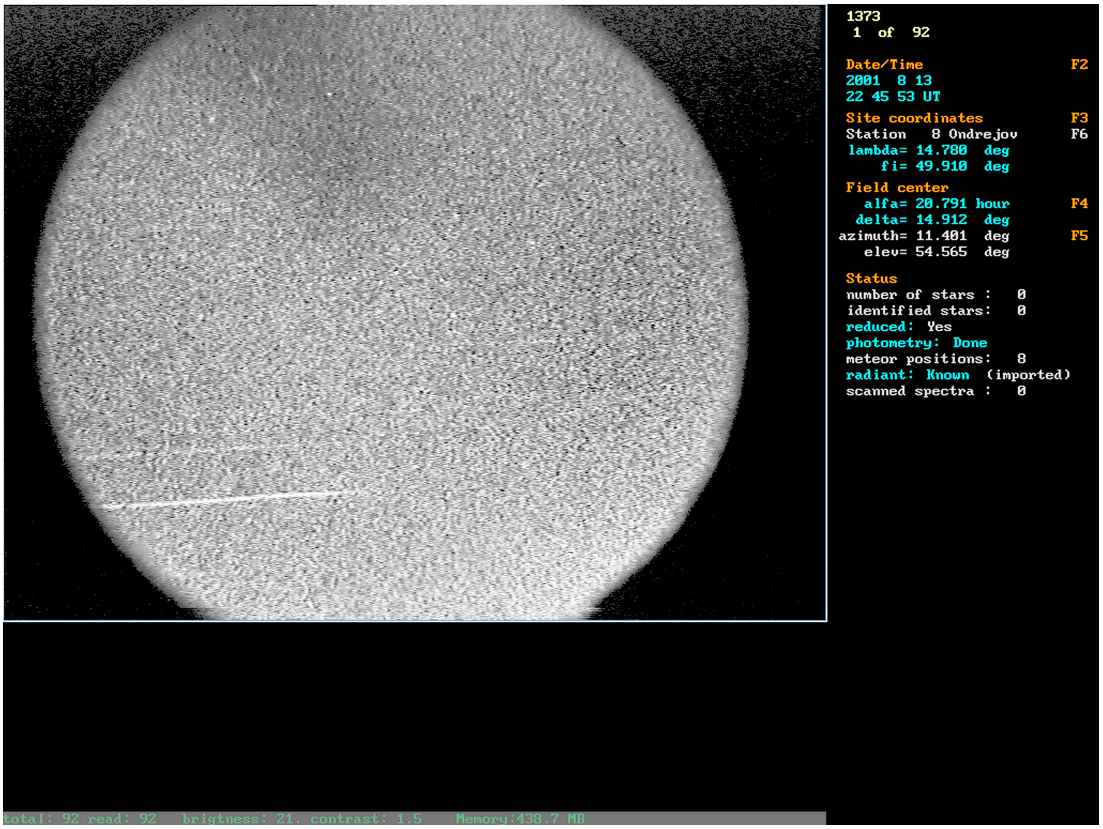
Za účelom spracovania zaveďme eMHV – *ekvivalentnú MHV*. Definujme ju ako magnitúdú hviezdy, ktorá dáva na jednej snímke zo zosilňovača signál 100/snímka. V praxi sa dostaneme aj k slabším hviezdam, ak budeme sčítavať viacej snímiek. Odozva kamery je lineárna, kým nedôjde k saturácii. To sa deje iba pre najjasnejšie hviezdy a pri redukcii je tento efekt ošetrený v programe. K saturácii u zelenej čiary nedochádza, nedosahuje tak vysokej intenzity. V grafe 16 je eMHV hodnota zodpovedajúca x-ovej zložke konca červenej čiara.

Pôvodný návrh spracovania TV záznamu vychádza z toho, že algoritmus nájde predpokladané hviezdy na prvých 7 snímkach TV záznamu a porovná ich teoretickými jasnosťami. Praktické skúsenosti v tejto práci ukázali, že je vhodnejšie hľadať hviezdy na väčšom počte snímiek – obraz sa vyhladí a hviezdy vystúpia zreteľnejšie zo šumu pozadia. Je ale treba dať pozor na to, aby spektrum na zvyšných snímkach neovplyvnilo polohy. Vyberáme teda len snímky na ktorých je spektrum už mimo obraz, alebo len slabé spektrá so zanedbateľným kontinuom – viď časť Identifikácia hviezd na strane 18. Rozpyl magnitúd hviezd v oboch prípadoch je na obrázkoch 15 a 16.

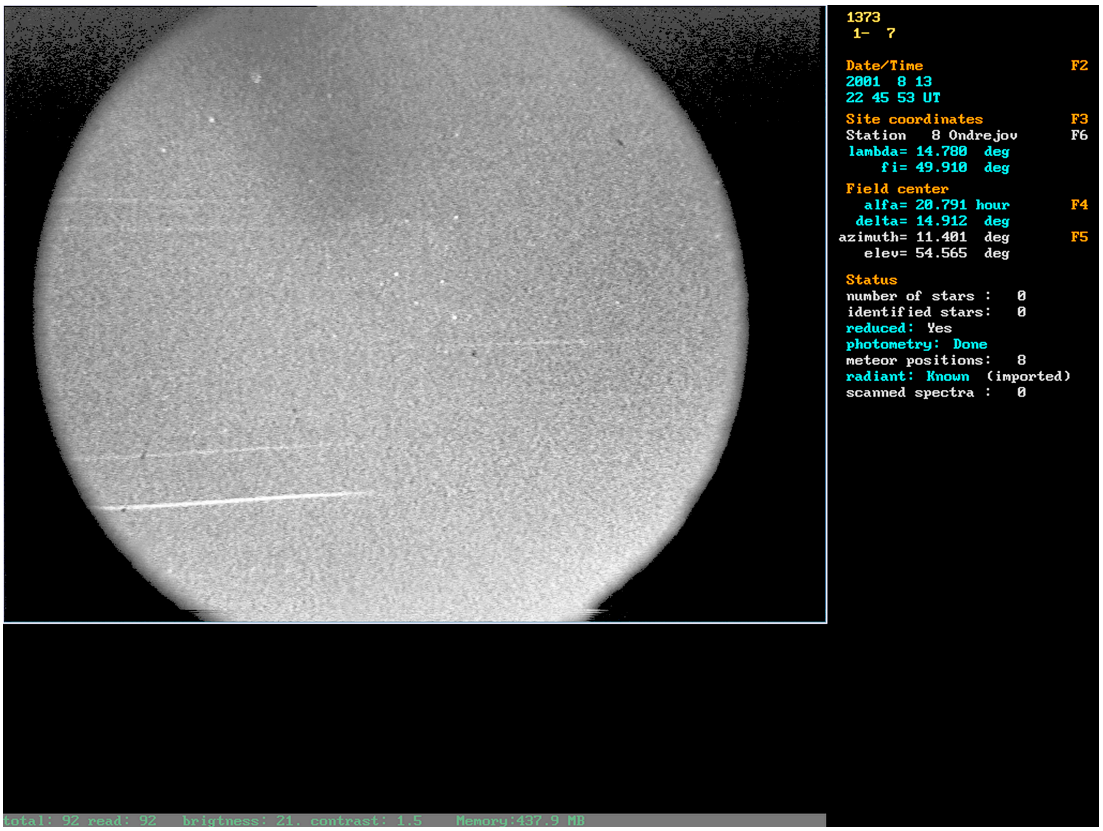
Predpokladajme v dobrej viere v matku prírodu, že ako šum pozadia, tak jasnosť intenzity hviezdy na jednotlivých snímkach má poissonovské rozdelenie.‡7 Chyba určenia magnitúdy hviezdy je potom úmerná $\propto 1/\sqrt{N}$ počtu spriemerovaných snímok. Viac snímok zníži chybu určenia jasu pozadia. Získame tým lepšie podklady pre určenie polohy, aj pre určenie MHV. Kamera smerovala pri pozorovaní zhruba 40° nad obzor. Pri priemere zorného poľa 20° a extinkcii 0,4 mag/airmass je rozdiel eMHV na spodnej a hornej hrane obrazu kamery $\approx 0{,}1$ mag.. Gradient extinkcie v hviezdnom poli môžeme teda zanedbať, predpokladajme, že na spodnej a hornej hrane je extinkcia rovnaká.

‡6 Väčšina zdrojov píše iba o jase pozadia, ale pri určovaní MHV treba započítať aj tmavý „zisk“ detektoru, resp. nastavenie zosilnenia image-intesifieru. Hovoríme o čísle vyjadrujúcom počet fotónov zachytených na detekčnej ploche voči jednému fotónu, ktorý pochádza z tmavého prúdu.

‡7 Inymi slovami, počas tak krátkej chvíle nedošlo na zázname k zmene vysokej oblačnosti, zaroseniu objektívu od náhodného výdychu, roztraseniu obrazu vďaka chveniu kamery vo vetre apod.



Obrázok 11 – *Jedna snímka AVI súboru v programe RESPEC.*



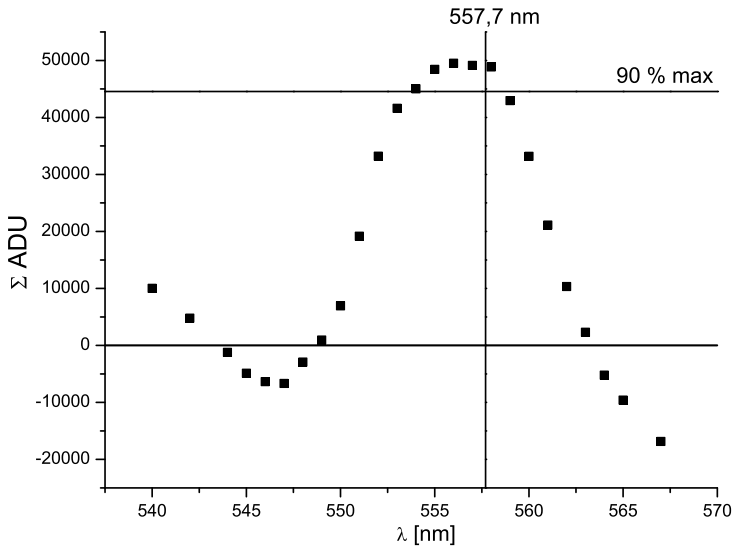
Obrázok 12 – *Medián prvých siedmich snímiek AVI súboru v programe RESPEC.*

Určenie polohy meteoru na snímkach

Meteory blízko stredu poľa sa zobrazia iba v nultom ráde, meteory vo vhodnej polohe sa zobrazia v 1. alebo −1. ráde. Pre polohy meteoru je podstatné určenie čela meteoru. Z neho môžeme následne určovať výšku, v ktorej sa nachádzal v danom okamihu, a teda aj výšku zelenej čiary. Meteory sa na oblohe objavujú náhodne. Spektrá meteorov by teda mali mať náhodné polohy a orientácie v zornom poli. Toto tvrdenie pre polohu sedí, pre orientáciu už nie. Dôvodom je, že pozorovacie kampane boli orientované na maximá silných rojov, a preto veľká časť meteorov sú meteory rojové. Ich smer je v poli rovnaký.

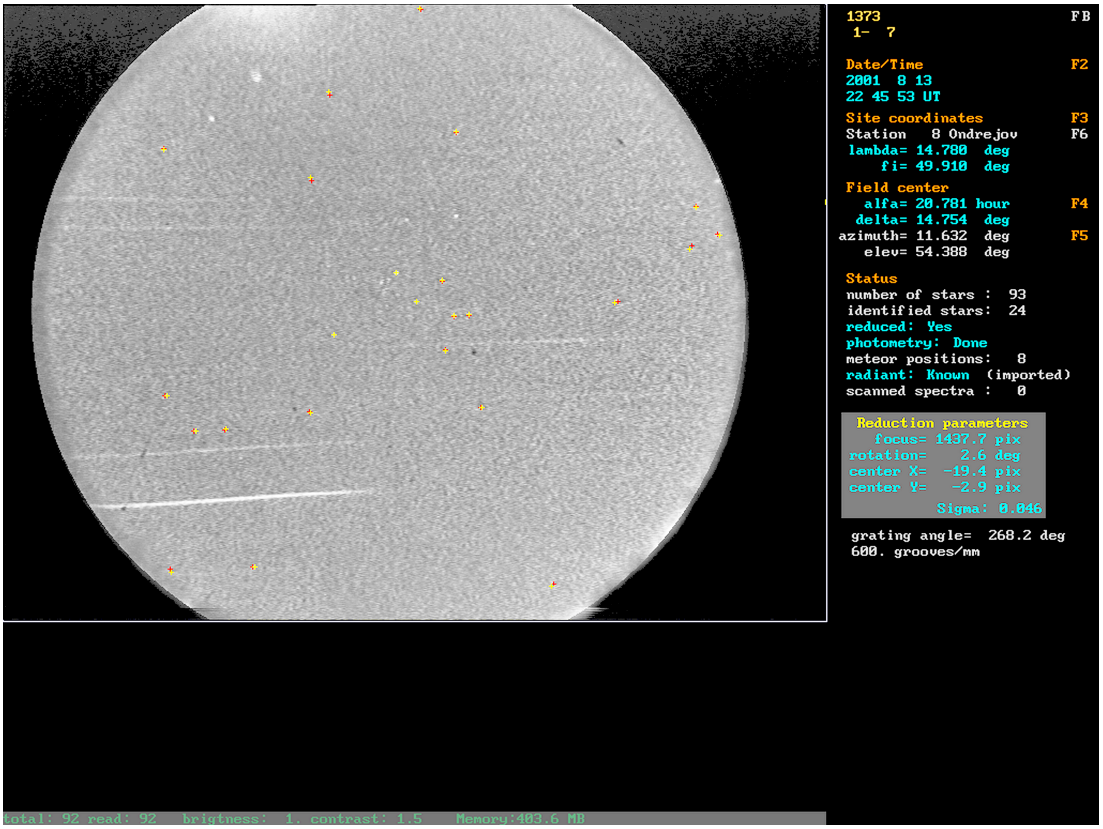
Výška meteoru sa berie zo súboru s výsledkami dvojstaničného pozorovania, zo súboru s príponom MIM. Určenie čela meteoru je potom závislé iba na súradniciach RA, DEC, nie na čase. Chyba určenia čela na snímke je vo väčšine prípadov niekoľko sto metrov. K chybe výšky meteoru najviac prispieva nepresnosť v redukcii polohy. V niektorých prípadoch bola tak veľká, že napriek kvalitnému spektru musel byť meteor vylúčený z ďalšieho spracovania.

Chyba vychádza jednak z chybnej polohy radiantu, jednak z chyby natočenia pri redukcii polohy. Nepresnosť v natočení polohy sa dá odstrániť selektívnym odstránením vybraných hviezd, ktorých poloha na snímke nesúhlasí s teoretickými súradnicami. Tento postup bol použitý pri redukcii všetkých meteorov. Nie je však isté, či takýto postup nevedie k skrytej systematickej chybe – väčšej ako u pôvodnej redukcii.

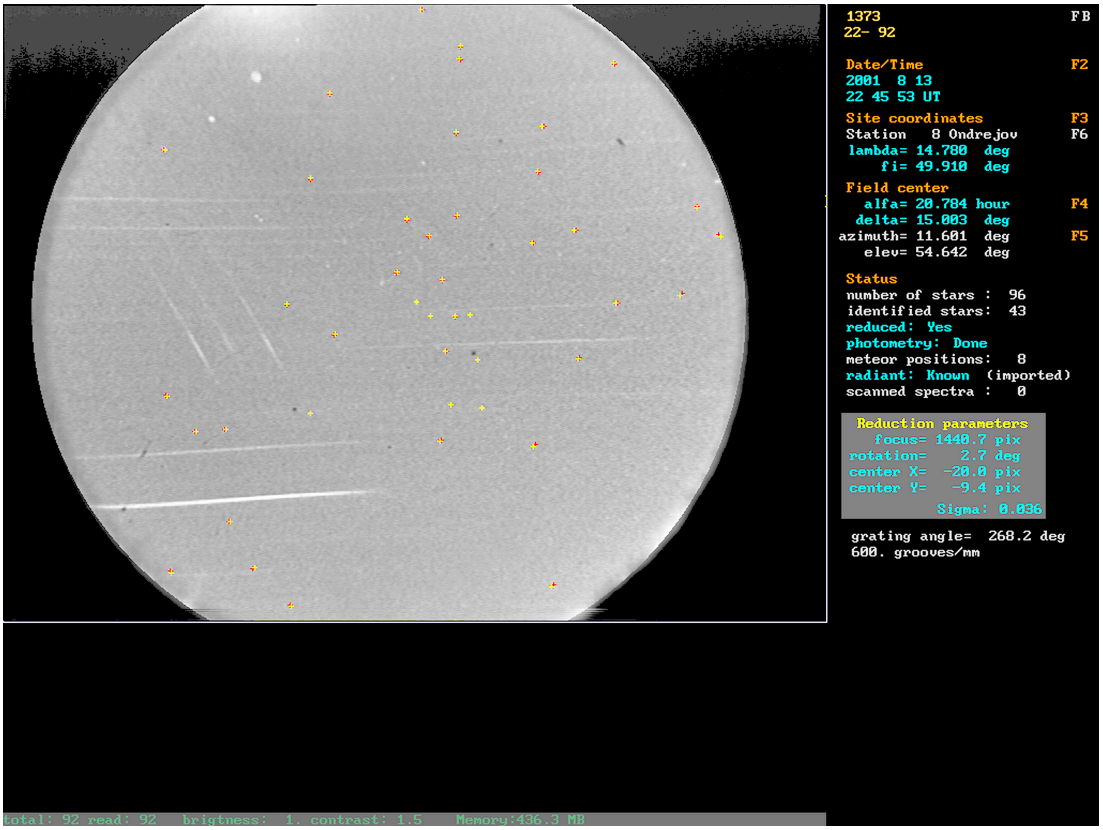


Graf 3 – *Porovnanie sumárneho signálu, získaného súčtom cez všetky výšky a snímky pre danú vlnovú dĺžku. Nárast na ľavej strane je spôsobený atmosférickým pásom, viď obr. 3. Vidieť, že v rozmedzí 10* nm *je celkový súčet intenzity vyšší ako 90 % maximálnej hodnoty. Bežná presnosť určenia stredu zelenej čiary je 1–2* nm.

Poloha meteoru sa určuje podľa typického spektra (napr. obr. 2). Rýchle meteory majú dominantnú čiaru O I, pomalé dublet sodíka. Výnimkou sú Geminidy, kde je často sodík málo intenzívny a kde dominantným znakom spektra sa stáva triplet horčíka (Borovička, 2005). Na tieto čiary je dobré sa zamerať pri určovaní



Obrázok 13 – *Snímka prešla dark a flatfieldom, prvých 7 snímok, identifikované hviezdy a porovnané s katalógom. Spektrum SZ1373.*



Obrázok 14 – *Snímka prešla dark a flatfieldom, snímky 22–92 (po prelete meteoru), identifikované hviezdy a porovnané s katalógom. Spektrum SZ1373.*

polohy čela meteoru. Ideálne je použiť čiary Mg I a Na I, pretože zelená čiara sa nachádza medzi nimi.

Existuje ešte jeden spôsob, ako určiť polohu čela meteoru. Zelená čiara býva najintenzívnejšia na snímkach 16–20. Spriemerovaním týchto snímok (alebo snímok, na ktorých je zelená čiara najintenzívnejšia) jej polohu zreteľne uvidíme. Nastavme smer letu meteoru a polohu zelenej čiary podľa priemeru. Čelo meteoru hľadáme podľa jemných náznakov spektrálnych čiar a kontinua (obr. 2). Pri určovaní čela meteoru sa pohybujme výlučne v smere letu meteoru – máme tak zaručené, že zelená čiara zostane na svojom mieste.

Určenie radiantu meteoru

Všetky použité meteory majú určenú dráhu z dvojstaničného pozorovania. Radiant je použitý z MIM súboru. Z polohy radiantu sa spočítajú všetky ďalšie údaje vstupujúce do výstupného súboru – výška meteoru a stopy, vzdialenosť od pozorovateľa, sklon dráhy meteoru voči rovine obzoru. Smer letu meteoru určený z polôh spektrálnych čiar nesmeruje presne k radiantu, ale je o malý uhol odklonený. RESPEC zoberie za polohu radiantu hodnoty z MIM súboru. To má za následok sklon štrbiny snímania voči zelenej čiare. Šírka štrbiny je (približne) 10 obrazových bodov. To znamená, že pri odchýlke 1 stupeň od radiantu sme schopní plne skenovať dĺžku 200–280 obrazových bodov (pixelov) (pri vzdialenosti radiantu 45–90 stupňov). Jeden kilometer výšky je vo väčšine prípadov okolo 10–15 obrazových bodov. Znamená to, že dokážeme bez straty časti žiarenia zelenej čiary namerať 40 kilometrov výšky. V praxi nie je zelená čiara dlhšia. Pre niektoré meteory je to ale príliš málo – u niektorých sa stalo, že okrajové časti zelenej čiary neboli vo vnútri štrbiny snímania. Tieto meteory boli použité taktiež. Množstvo vyžiarenej energie táto systematická chyba neovplyvní. Rovnako časové rezy a parametre získané fitom integrálnej krivky intenzity budú ovplyvnené iba minimálne.

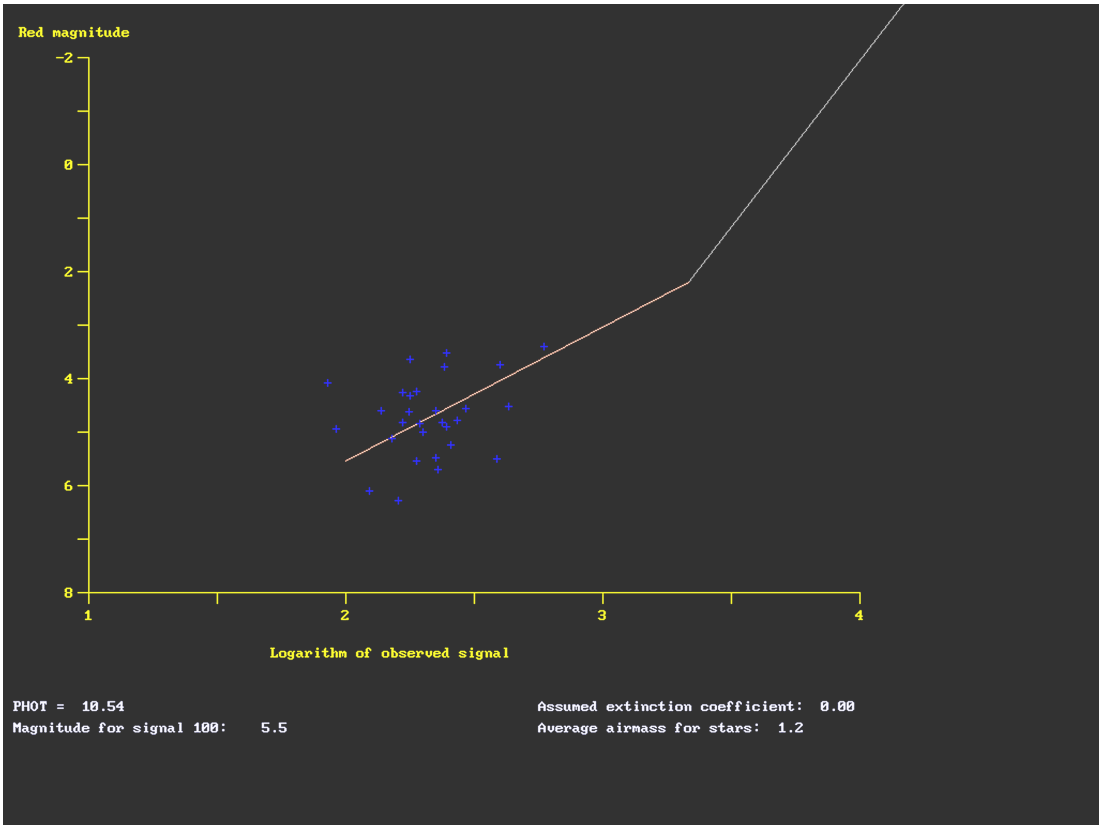
Keď hrozilo, že štrbina nebude skenovať zelenú čiaru aj v oblastiach, kde je ešte intenzívna, bolo spektrum z ďalšieho spracovania vyradené. To sa stalo len u meteorov s väčším odklonom, ktoré boli na prvý pohľad rozoznateľné.

Jednostaničné meteory

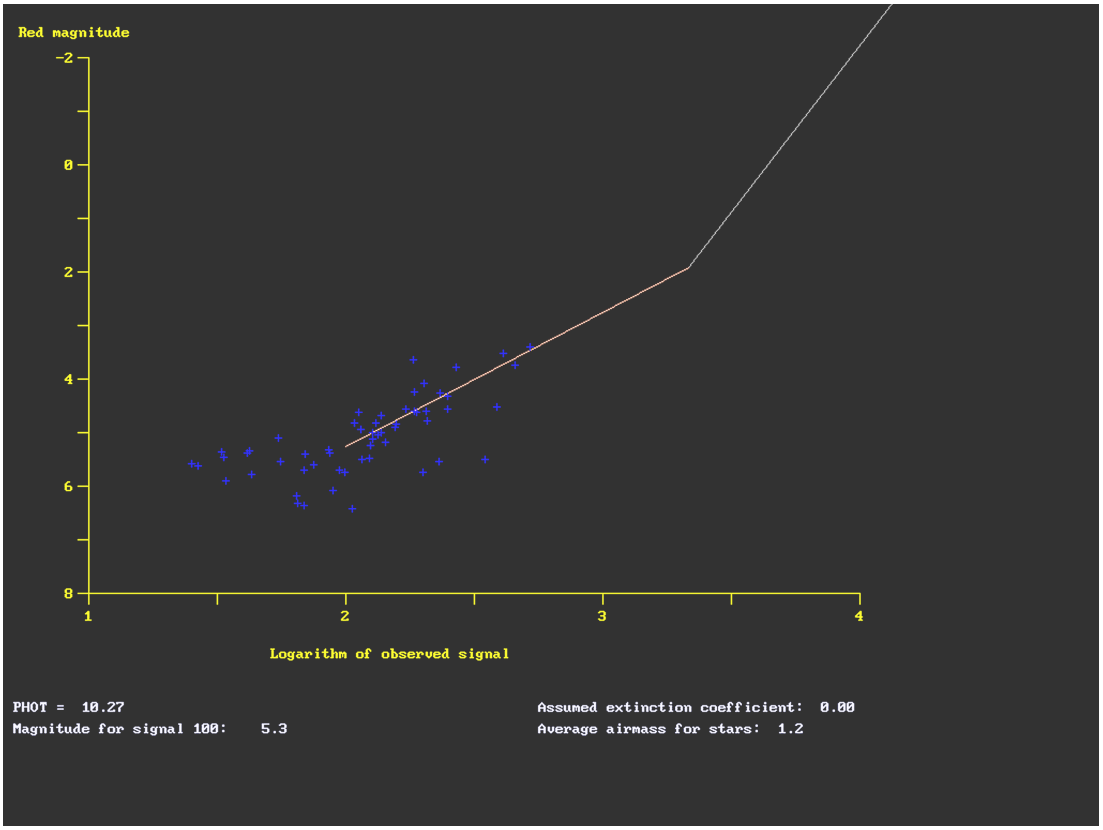
Zaujímavé výsledky dáva porovnanie radiantu dvojstaničného meteoru s radiantom z jednostaničného meteoru. Oba výsledky získame z toho istého meteoru. V prvom prípade využijeme MIM dáta, v druhom prípade určíme radiant meteoru nasledujúcou metódou: zoberieme dráhu meteoru ako najväčšiu kružnicu a hľadáme bod, v ktorom je kružnica najbližšie strednému radiantu roja. Tento bod označíme za radiant.

V prípade silných rojov, ako sú napr. meteorický dážď Leoníd, je drvivá väčšina meteorov rojových so silne kondenzovaným radiantom. Z dvojstaničných meteorov teda určíme radiant a s ním budeme počítať pri jednostaničných meteoroch. Získame tak väčšiu vzorku spektier a pritom nestratíme presnosť. Jednostaničné meteory sú veľmi citlivé na výšku maxima, naopak nie sú citlivé na ďalšie parametre, ako napr. pološírku w, pomer $F_{\mathrm{inc}}/F_{\mathrm{dec}}$ (viď rovnica (8)) atď.

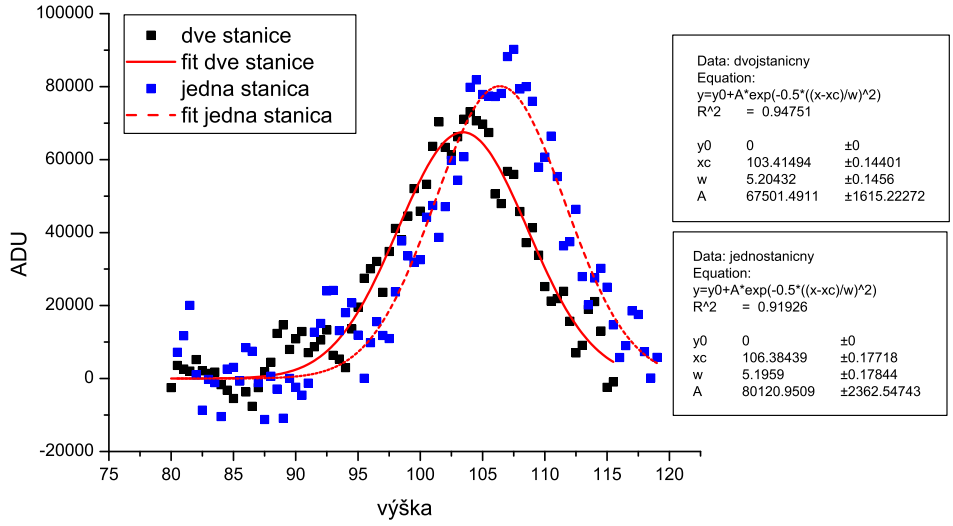
V tejto práci neboli z dôvodu zachovania homogenity analyzovanej vzorky použité žiadne jednostaničné meteory. Počet jednostaničných meteorov so spektrom je vyšší ako dvojstaničných. Uvedená analýza ukazuje, že v budúcnosti je možné



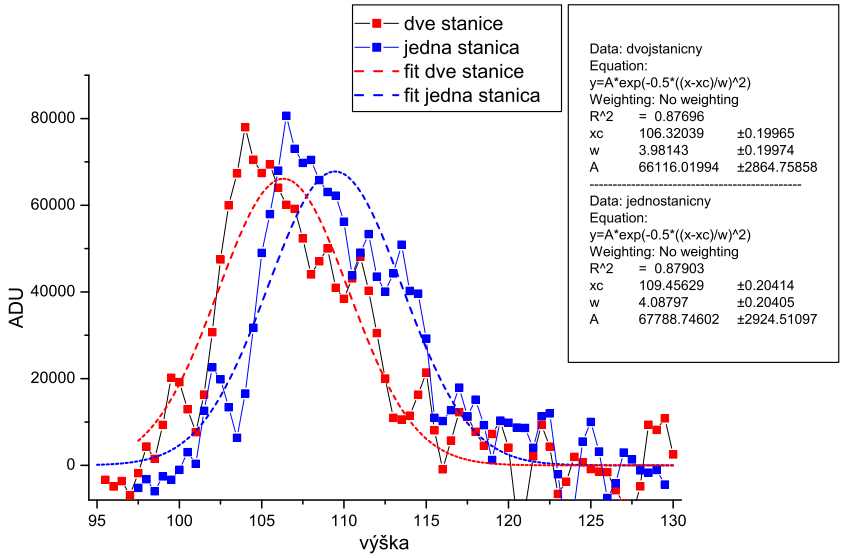
Obrázok 15 – *Graf závislosti magnitúdy identifikovaných hviezd na pozorovanom signále. Spektrum SZ1373 s mediánom snímok 1–7. Os x je v* log ADU.



Obrázok 16 – *Graf závislosti magnitúdy identifikovaných hviezd na pozorovanom signále. Spektrum SZ1373 s mediánom snímok 22–92. Os x je v* log ADU.



Graf 4 – *Porovnanie fitov vybraného meteoru SZ1362 pre jednostaničné a dvojstaničné meranie. Bolo vybrané spektrum veľmi jasného meteoru, aby boli rozdiely medzi oboma fitmi zreteľné a nedali sa prisudzovať náhodnému šumu.*



Graf 5 – Porovnanie fitov vybraného meteoru SZ1173 pre jednostaničné a dvojstaničné meranie. Bolo vybrané spektrum veľmi jasného meteoru, aby boli rozdiely medzi oboma fitmi zreteľné a nedali sa prisudzovať náhodnému šumu. Radiant jednostaničného meteoru je radiant Leoníd z návratu 2000 ($\alpha = 153{,}4°$; $\delta = 21{,}8°$).

Skutočný radiant meteoru je $\alpha = 153{,}37 \pm 0{,}15°$; $\delta = 22{,}12 \pm 0{,}15°$. Znamená to, že pri bežnom určení polohy radiantu (chyba $\pm 0{,}15°$) je absolútna chyba v určení výšku približne 1–2 km. *Chyba tiež záleží na rýchlosti meteoru a geometrii.*

skúmať výškové a časové zmeny zelenej čiary aj z jednostaničných pozorovaní,

napríklad porovnaním vlastností zelenej čiary pre Leonidy, Perzeidy a Geminidy. Je ale nutné byť si vedomý niektorých obmedzení, ktoré táto metóda prináša.

Sken pozdĺž čiary 557,7 nm

Určením radiantu meteoru máme určenú dráhu meteoru v atmosfére. môžeme teda pristúpiť k zmeraniu intenzity zelenej čiary v atmosfére. Vďaka nepresnostiam v redukcii polohy sa však niekedy zelená čiara nachádza na snímke niekde inde, ako predpokladá program. Tento posun je zreteľne viditeľný, ale vo väčšine prípadov prispieva k chybe výšky menej ako 0,5 kilometra. Je preto nutne doladiť polohu štrbiny, cez ktorú sa bude skenovať. Vlnovú dĺžku štrbiny treba ručne nastaviť tak, aby zaberala celú šírku čiary, viď graf 3.

- Program skenuje RAW data (opravene iba o dark a flatfield). Opravou sa odstráni nerovnomernosť osvetlenia pozadia. Hviezdy a artefakty obrazu sa odstránia odčítaním priemeru snímok 1–7.
- Ako bolo uvedené vyššie, je treba skontrolovať stočenie zelenej čiary voči radiantu. Ak je stočenie akceptovateľne malé (vo väčšine prípadov áno), spektrum použijeme v analýze ďalej. Ak je meteor dlhý, tak na jeho koncoch už nezaznamenáme celú čiaru do štrbiny skenu, ale len jej časť. Preto na koncoch silných a výrazných meteorov bude silnejší útlm.
- Chyba určenia absolútnej polohy meteoru v obraze nie je kritická. Podstatne horšie je na tom chyba pootočenia poľa – je treba venovať veľkú pozornosť natočeniu poľa pri redukcii. Aj malá chyba vedie k veľkým chybám v určení polohy zelenej čiary a výšky meteoru. Napriek tomu že chyba v posune je pár obrazových bodov, pootočenie o 1 stupeň vedie k posunu $1^\circ \times$ priemer zorného poľa.
- Rezy v danej výške sa prekrývajú: ak napr. meriame vo výške 100 km s krokom 0,5 km, potom v štrbine máme fotóny z rozmedzia 99,5–100,5 km, a nie 99,75–100,25 km, ako by sa dalo predpokladať. Preto sú všetky hodnoty hodnoty v ALS súbore zdvojené a čiastočne vyhladené. Ak chceme nevyhladené dáta, musíme z ALS súboru pri spracovaní vypustiť každý druhý riadok. Pri spracovaní boli použité vyhladené dáta, získané výsledky boli lepšie. Je to spôsobené šumom pozadia, na väčšom počte obrazových bodov klesá veľkosť šumu na jeden obrazový bod (pixel).
- Signál obrazových bodov ležiacich len čiastočne v bunke je pripočítaný v pomere, v akom leží daný obrazový bod v bunke.

Výsledkom je ALS súbor, ktorý obsahuje časovú a výškovú závislosť intenzity zelenej čiary. Časový krok je 1 snímka, výškový krok sa udáva ručne, štandarne je 0,5 kilometra. Dĺžka každej čiary je rovná dráhe, ktorú prejde meteor za 1/25 sekundy.

4 Časové rezy – parabola

Pri pohľade na časový vývoj veľmi jasných spektier zreteľne vidieť, ako jasnosť zelenej čiary stúpa, dosahuje maxima a potom klesá. Nás bude zaujímať, na akých parametroch závisí poloha maxima a jeho amplitúda. Rovnako sa budeme zaoberať rýchlosťou nárastu a poklesu zelenej čiary v čase.

Za týmto účelom definujme *časový rez* vo výške h. Časový rez je postupnosť intenzít v danej výške, ktorý má vzorkovanie časovej osy x v snímkach a osy y v ADU. Nulový bod osy x je daný okamihom preletu meteoru vo výške h.

4.1 Hľadanie maxima pomocou kvadratického fitu metódou najmenších štvorcov

V prvom okamihu predpokladajme, že nie je známe žiadne fyzikálne vysvetlenie tvaru časovej závislosti. Fyzikálne čisto formálne riesenie má tú vlastnosť, že u vstupných dát netreba nič predpokladať a výsledky je možné interpretovať bez ohľadu na prebiehajúce fyzikálne procesy.

Pre hľadanie takého nesymetrického profilu bude vhodné hľadať maximum pomocou nejakej funkcie s maximom. Z dôvodu jednoduchosti bola zvolená parabola – kvadratický fit. Bol urobený kompromis a bola uprednostnená jednoduchosť funkcie pred jej asymetriou. Pre parabolu existuje exaktné riešenie problému, čo je ďalšou výhodou tohoto postupu.

Pre daný dataset a kvadratickú regresiu hľadáme

$$\sum \left(y_i - Ax_i^2 - Bx_i - C\right)^2 = \min. \tag{3}$$

Minimum nájdeme použitím parciálnych derivácií: rovnica (3) derivovaná podľa $\partial/\partial A$, $\partial/\partial B$ a $\partial/\partial C$ sa musí rovnať 0 v bode minima (lokálneho aj globálneho).

Úpravami dospejeme k sústave rovníc o troch neznámych A, B, C,

$$\begin{array}{rcrcrcrcl} A\sum x_i^4 & + & B\sum x_i^3 & + & C\sum x_i^2 & - & \sum x_i^2 y_i & = & 0 \\ A\sum x_i^3 & + & B\sum x_i^2 & + & C\sum x_i & - & \sum x_i y_i & = & 0 \\ A\sum x_i^2 & + & B\sum x_i & + & C\sum x_i^0 & - & \sum y_i & = & 0 \end{array} \tag{4}$$

ktorú budeme riešiť podielom determinantov D a D_A, D_B, D_C. Z estetických a symetrických dôvodov a z dôvodu zrozumiteľnosti bolo zaviedené $x_i^0 = 1$.

4.2 Program p_par

Bol vyvinutý program `p_par`, ktorý vyhľadáva v časových rezoch zhluky bodov pripomínajúce paraboly. Nie je schopný rozlíšiť reálnu parabolu maxima zelenej čiary od náhodnej paraboly napr. dlho po prelete meteoru, keď už je zelená čiara slabá a prekrytá šumom.

Program je napísaný v jazyku C. Jeho úlohou je nájsť všetky vhodné paraboly, ktoré by nás mohli zaujímať. Zo vstupných dát (CSV súbor obsahujúci dvojice

číslo snímky, intenzita) nájde všetky paraboly vyhovujúce počiatočným podmienkam (implicitné hodnoty je možno zmeniť v konfiguračnom súbore `R2_conf`). Pre všetky dvojice (min_frame, max_frame) spočíta parabolický fit nad množinou bodov p_i takých, že platí min_frame $\leq p_i \leq$ max_frame, a ďalej s ním naloží podľa pravidiel spomenutých na strane 31, poprípade pridá ďalšie podmienky. Výstupom je pre každé spektrum a každý časový rez v danej výške BMP súbor ukazujúci pre každú dvojicu (min_frame, max_frame) kvalitu fitu a LOG súbor obsahujúci vyhovujúce paraboly. Naviac pre každé spektrum je vytvorený ALL.LOG, ktorý obsahuje rýchlu analýzu všetkých LOG súborov.

Okrajové podmienky

Pri hľadaní maxima budeme fitovať parabolu s okrajovými snímkami. Zo vstupných súborov s časovými rezmi načítame dvojice snímka—intenzita v danej výške a budeme hľadať fit pre všetky dvojice snímiek min_frame, max_frame > 0 také, že min_frame $<$ max_frame a $N_{\text{min.}} =$ min_frame $-$ max_frame ≥ 6. Konštantu $N_{\text{min.}}$ možno v `R2_conf`) zväčšiť, ale nemožno ju zmenšiť. Pre každú parabolu je spočítaný *koeficient determinácie* R^2, určený vzťahom

$$R^2 \equiv 1 - \frac{\sum_i \left(y_i - f(x_i)\right)^2}{\sum_i \left(y_i - \overline{y}\right)^2}\,, \tag{5}$$

kde y_i je i-ta hodnota y, $f(x_i)$ funkčná hodnota v bode x_i a $\overline{y}$ stredná hodnota y.

Koeficient determinácie je vždy menší ako 1. Hovorí nám, koľko variability skúmanej vzorky možno vysvetliť navrhovanou funkčnou závislosťou. Závisí na počte parametrov funkcie. S rastúcim počtom parametrov mierne rastie. Preto je treba byť opatrný pri interpretácii dvoch modelov, pričom každý z nich má rôzny počet parametrov. Koeficient R^2 bol použitý namiesto hodnôt získaných metódou najmenších štvorcov. Dôvodom sú veľké štatistické chyby na vstupe, kedy zlyháva štatistika metódy najmenších štvorcov. V tabuľke 3 je možno porovnať hodnoty A a ΔA. Ak by sme štandardným prenosom chýb určovali chybu $H_{\text{krit.}}$, tak dostaneme $\Delta H_{\text{krit.}} > H_{\text{krit.}}$, čo je fyzikálne neprijateľné.

Ďalšia analýza použije iba fity spĺňajúce nasledujúce podmienky:

- Minimálny počet po sebe idúcich snímok $N_{\text{min.}}$ je 7.
- $R^2 > 0$. Predpokladáme že parabola vysvetlí aspoň časť variability.
- Maximum paraboly $x_{\max}$ sa nachádza v intervale (min_frame, max_frame). Ak by sme mali maximum mimo interval (min_frame, max_frame), potom by sme ho museli nájsť aj pri zmene krajného bodu intervalu tak, že by sa maximum už nachádzalo vovnútri intervalu.
- Hľadáme maximum, preto očakávame $A < 0$. Vďaka dosvitu bude pre vyššie hodnoty min_frame, max_frame veľmi veľa riešení. u ktorých bude $A > 0$, pretože klesajúca exponeciála sa dá v dobrom priblížení aproximovať parabolou. Tieto nás nezaujímajú.

4.3 Generovanie cipher mapy

Cipher mapa je vizuálna pomôcka, generovaná programom `p_par`. Jej úlohou je ukázať rozloženie oblastí s vysokým výskytom parabol, ktoré nás zaujímajú.

Zo všetkých získaných dvojíc vyberieme tie nevhodné fity, ktoré spĺňajú nasledujúce požiadavky:

1. majú $A > 0$ (hľadáme maximum, nie minimum),
2. sa nenachádzajú v intervale min_frame $< -B/2A <$ max_frame (očakávame, že maximum by sa nachádza medzi krajnými bodmi datasetu, na ktorom fitujeme).

Nevhodné fity v cipher mape generujú spojité plochy, budeme ich pre našu potrebu označovať azúrovou farbou. Tmavším odtieňom je označený fit (ne)spĺňajúci podmienku 1., svetlejším fit s maximom mimo uvedený interval (t.j. 1. podmienku nespĺňa, ale 2. spĺňa).

Odtieňmi sivej farby budeme označovať tie fity, ktoré spĺňajú obe uvedené podmienky. Odtieň budeme počítať tak, že $R^2 \leq 0$ bude čierny ($G = 0$), najlepší fit bude biely ($G = 255$) a všetky ostatné fity s $R^2 < 0{,}85$ budú mať mať farbu danú hodnotou $G = \lfloor 27 + 100 \cdot R^2 \rfloor$. Najlepšie fity s $R^2 > 0{,}85$ budú preznačené do odtieňov červenej a modrej farby, aby sme mohli jednoducho vidieť hľadané body. Z čistej azurovej farby $RGB = (0, 128, 128)$ postupne prejdeme k čistej červenej $RGB = (255, 0, 0)$ pre $R^2 \to 1$. Uvedené farebné schéma bolo získane metódou pokus–omyl tak, aby výsledky boli čo najnázornejšie.

Na grafe 6 vidieť zmenu intenzity zelenej čiary za meteorom pre spektrum SZ1175 vo výške 111 kilometrov. Horný graf ukazuje časový rez, spodný cipher mapu. Mierka na osi x aj y na cipher mape predstavuje jedna snímka $= 1/25$ sekundy. Jednotlivé čísla priraďujú maximá medzi dolným a horným grafom. Najvýraznejšie maximum nastáva hneď na začiatku. Vyskytujú sa tam veľmi dobré fity, ktoré naozaj pripomínajú parabolu. Tieto fity sa vyskytujú pospolu, čo znamená že to nie sú náhodné javy dané fluktuáciou pozadia a nepravidelností v dosvite zelenej čiary. Algoritmom nájdený najlepší fit je označený čistou bielou – je to fit úplne vľavo dole (parabola snímkami 1–8). Ako ale z obrázku vyplýva, má síce najvyššiu hodnotu R^2, ale k riešeniam s okrajovými snímkami 3–23 má ďaleko.

4.4 Analyza R^2

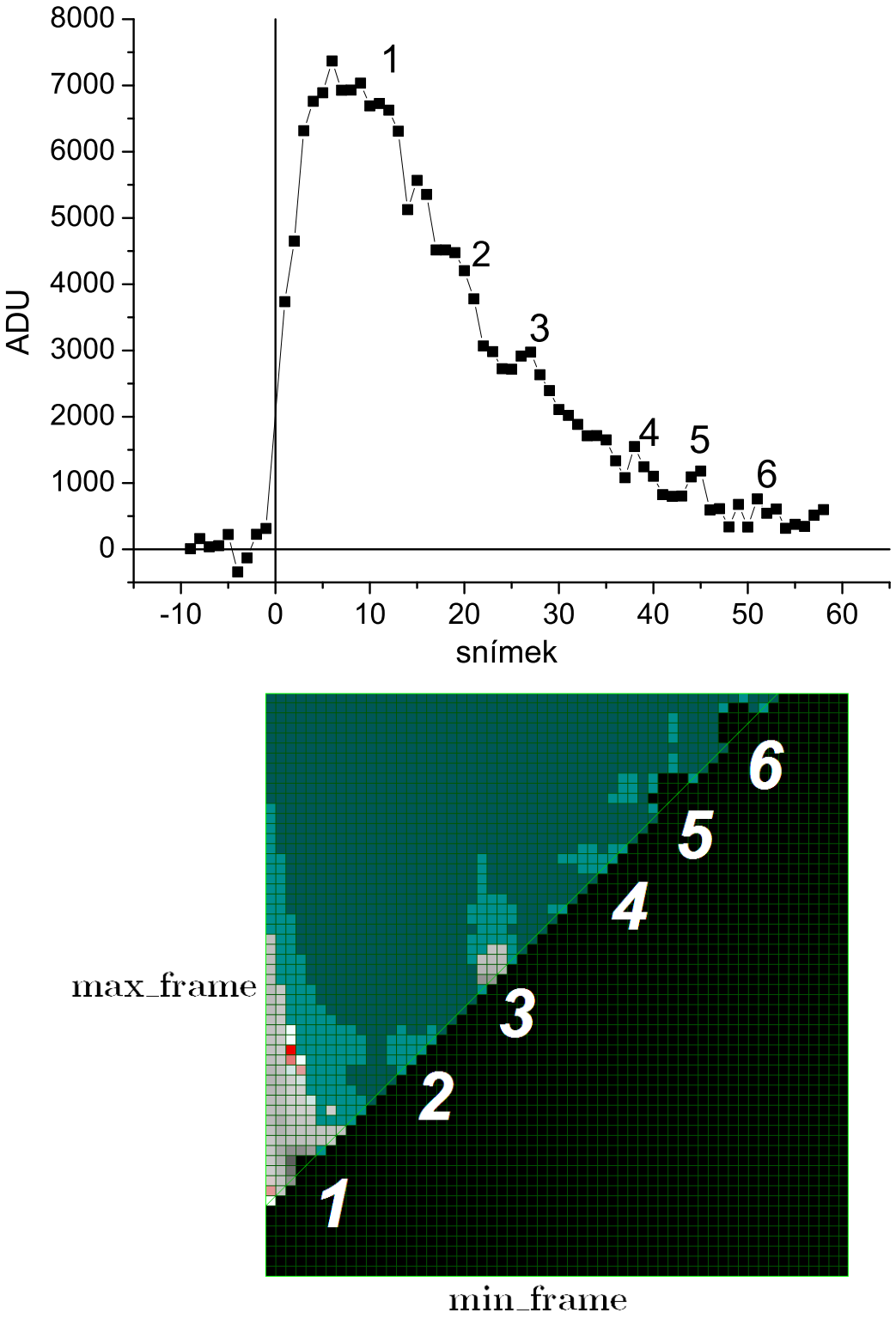
Je nutné určiť, či $x_{\max}$ je reálny, alebo sa jedná iba o náhodnú koincidenciu. Vysoká hodnota R^2 nezaručuje, že sme skutočne dostali kvalitný fit. Bola preto urobená hlbšia analýza na spektre SZ1175.

Experimentálne bolo zistené, že približne platí $\langle \sigma(y - y_i) \rangle = K_1 \cdot (1 - R^2)^{K_2}$. Toto bolo zistené ako na reálnych dátach SZ1175, tak na náhodných dátach získaných z random seedu[‡8] s normálnym rozdelením $N(0, 1)$. Samotný fit bol z dôvodu relevancie $\sum \varepsilon_i^2$ robený v log–log diagrame metódou najmenších štvorcov.

$$\ln(1 - R^2) = \alpha + \beta \langle \sigma(y - y_i) \rangle \,.$$

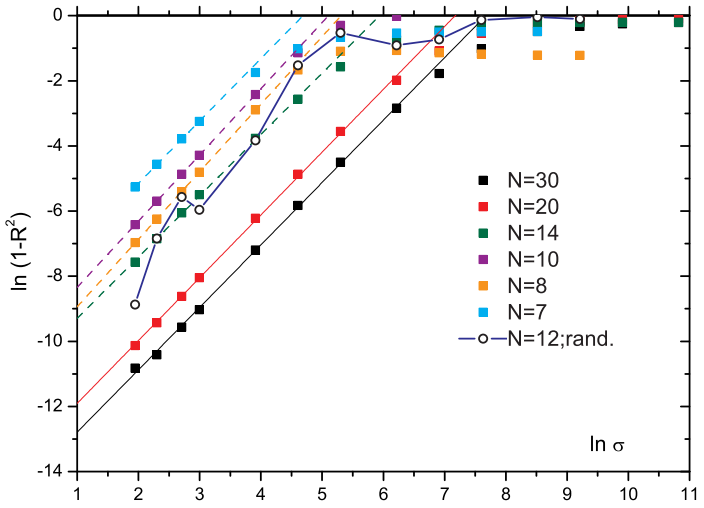
Pre zjednodušenie označme ďalej $\langle \sigma(y - y_i) \rangle = \sigma$.

[‡8] *Random seed* je počiatočný vektor náhodných čísiel, z ktorého potom program (generátor) konkrétnym algoritmom generuje pseudonáhodné čísla.



Graf 6 – *Príklad časového rezu a jemu zodpovedajúcej cipher mape.*

Zo hodnôt vstupných dát SZ1175 (pre krajné framy 1, 11; $R^2 = 0{,}88$) vychádza $\alpha = -13{,}3 \pm 0{,}6$ a $\beta = 1{,}77 \pm 0{,}13$. Táto hodnota bola získaná pridaním šumu k existujúcim dátam.



Graf 7 – *Nad umelým datasetom ideálnej paraboly bolo k y pridané σ s normálnym rozdelením tak, aby sme mali nenulové ε_1^2. Cieľom bolo skúmať oblasť linearity medzi* $\ln\sigma$ *a* $\ln(1-R^2)$. *Písmeno N vyjadruje počet bodov, ktorými fitujeme parabolu. Pre rôzne počty bodov bol použitý odlišný seed, nad ktorým sme variovali ε_1^2 pre rôzne σ.*

Pre porovnanie bol pridaný dataset, v ktorom sme menili zároveň σ aj random seed. Z neho vidíme, že pri rovnakej hodnote N sa nám β nemení a mení sa iba α.

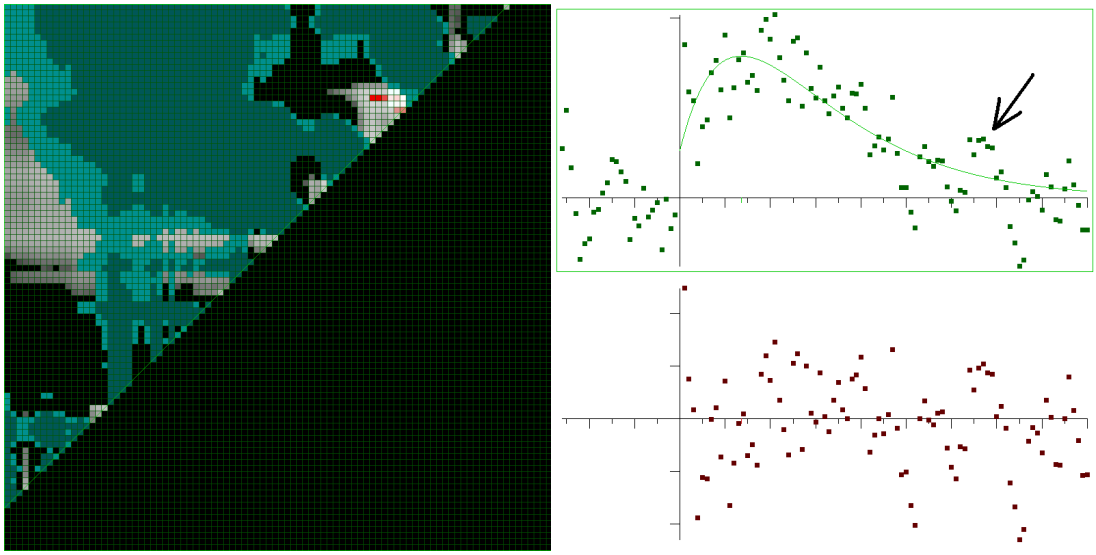
Pre naše potreby určíme $R^2_{\max}$ také, aby ešte fit mal zmysel. V princípe nemožno dosiahnuť väčšiu presnosť, pretože prirodzený šum σ zvyšuje reziduá dátovej rady. Ak bude $R^2 > R^2_{\max}$, jedná sa už o náhodnú koincidenciu.

Ešte dôležitejšie je zistiť, aké minimálne $R^2_{\text{min.}}$ je relevantné pre naše odhady maxima. Pri pohľade na graf 7 vidíme, že pre vysoké hodnoty σ sa body ohýbajú k priamke $\ln(1-R^2) = 0$. Experimentálne bolo zistené, že ohyb nastáva pre $R^2_{\text{min.}} = 0{,}85 \pm 0{,}05$ pre $N \geq 7$. Tento ohyb závisí na počte bodov v datasete. Všetky datasety konvergujú k istej hodnote R^2_∞, danej fitom čistým seedom bez paraboly. Ak je $R^2 > R^2_{\text{min.}}$, fit možno považovať za dobrý. Fity s nižšou hodnotou R^2 sa považujú za nevyhovujúce, napriek tomu, že väčšina z nich bude reálnych. Treba si taktiež uvedomiť, že vstupujúce dáta v skutočnosti nemajú tvar paraboly, že sa jej iba blížia.

Ďalším problémom je, že v datasete sa objavujú dáta, ktoré sa podobajú skutočnej parabole. Napr. u spektra SZ2157 sa medzi snímkami 66 až 75 (graf 8, dohromady 10 po sebe idúcich snímiek) po prelete meteoru vytvoril charakteristický rys – parabola – s $R^2 = 0{,}98$ (mimochodom druhá najvyššia hodnota z analýzy všetkých snímiek).

Pre vyšší počet bodov N je rozumné posunúť hranicu $R^2_{\text{min.}}$ nižšie. Časové rezy spektier vo výškach nad 110 kilometrov majú ploššie a menej výrazné maximum. Ak by sme aplikovali rovnakú hranu (threshold) $R_{min.}$ ako u spektier v nižšej výške, nedostali by sme skoro žiadne výsledky. Preto bola urobená analýza závislosti počtu framov N a parametrov α a β.

Analýzou uvedených fitov sme dospeli k rovnici, popisujúcej závislosť počtu framov N, koeficient determinácie R^2 a rozptyl vstupných hodnôt σ. Treba pove-



Graf 8 – *Cipher mapa a časový rez výšky 126 kilometrov spektra SZ2157. Šipkou je označená náhodná parabola s mimoriadne vysokou relevanciou.*

dať, že σ v skutočnosti zakrýva výšku maxima. V budúcnosti by bolo vhodné namiesto σ zaviesť pomer signál/šum, pomer medzi σ a intenzitou v okamihu maxima vyžarovania (pre SZ1175 pri $R^2_{\max} = 0{,}9$ bol tento pomer $4:1$)

$$\ln(1 - R^2_{\text{min.}}) = (8{,}58 \pm 0{,}06) + (-0{,}24 \pm 0{,}06) \cdot N + (1{,}982 \pm 0{,}006) \cdot \ln \sigma \quad (6)$$

Tieto znalosti by bolo možné využiť pri automatickom hľadaní extrémov. Vieme, že fit lepší ako $R_{\max}$ nemá fyzikálny význam, rovnako ako malé amplitúdy signálu. Je preto rozumné hľadať zhluk píkov s vysokým R^2 s hodnotami blížiacimi sa $R_{\max}$. Analýzou týchto hodnôt (strednou hodnotou z bodov v okolí s R^2 porovnateľnou s $R_{\max}$ s váhou) by bolo možné bez zásahu človeka nájsť maximum vyžarovania zelenej čiary s podobnou presnosťou, ako keby bola analýza urobená ručne.

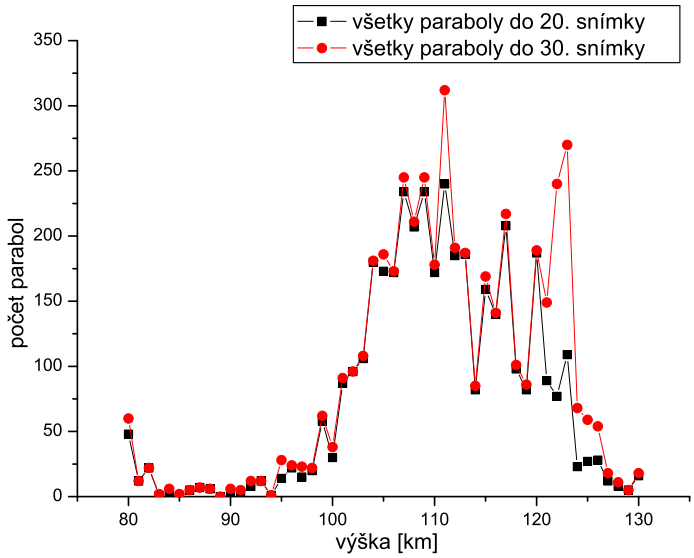
4.5 Postup pri analýze výsledkov – analýza všetkých parabol

Analýza stredných hodnôt

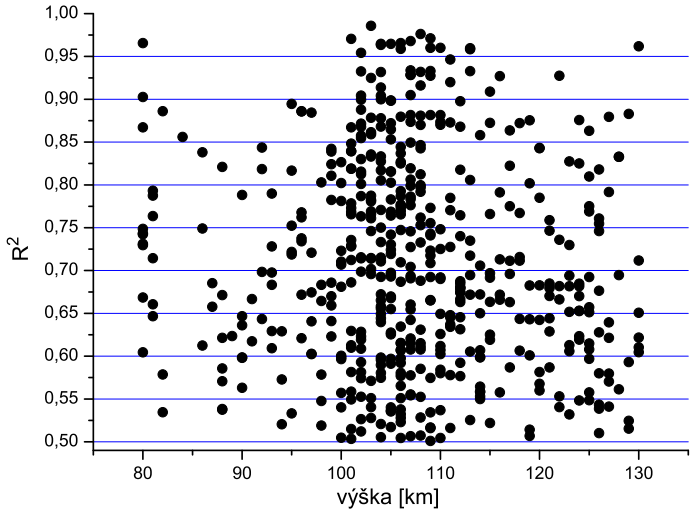
Analýza neprebiehala na všetkých parabolách, ale len na tých, ktoré spĺňali isté podmienky. Okrem podmienok spomenutých na strane 31 boli pridané ďalšie obmedzenia:

- Parabola musí mať maximum $x_{\max} < 20$ (snímiek) pre $h < 115$ km alebo $x_{\max} < 30$ (snímiek) pre $h \geq 115$ km. Dôvodom je nárast počtu parabol s maximom nad 20. snímkom nad 115. kilometrov výšky, viď graf 9.
- Minimálny počet po sebe idúcich snímiek je 8.
- Hodnota R^2 fitu parabolou musí byť minimálne 0,65.

Zvýšenie minimálneho počtu bodov vo fite a zníženie $R^2_{\max}$ bolo zavedené na základe testov, ktoré mali za úlohu nájsť najvhodnejšie nastavenie parametrov.



Graf 9 – *Porovnanie počtu parabol (viď graf 13) v závislosti na výške časového rezu.*

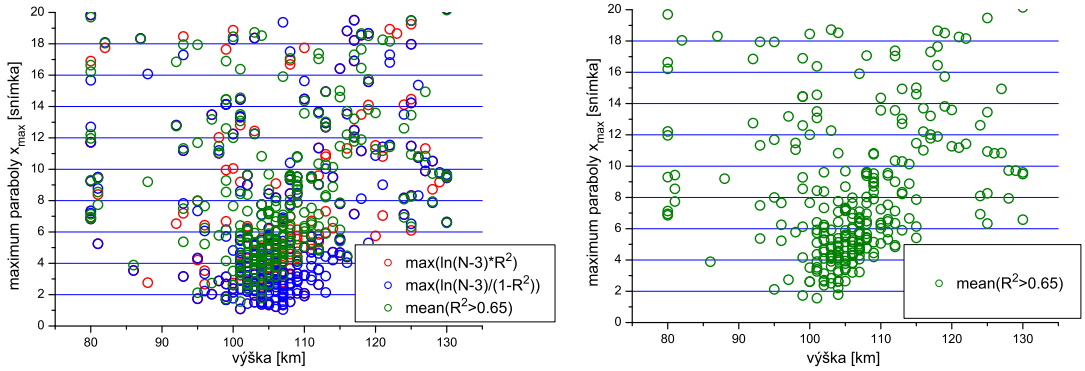


Graf 10 – *Zobrazenie všetkých parabol, ktorých* $R^2 > 0{,}5$.

Za cenu pridania niekoľkých náhodných parabol získame veľké množstvo ďalších reálnych. V grafe 6 je oblasť 1 tá, ktorá nás zaujíma, a oblasti 2–6 zjasnenia, ktoré nás nezaujímajú.

Graf 10 ukazuje všetky paraboly s $R^2 > 0{,}5$. Ak by sme nechali $R^2_{\min} = 0{,}85$, potom by sme stratili takmer všetky (relevantné) paraboly vo výškach nad 110 kilometrov. Hrana $R^2_{\max} = 0{,}65$ je kompromisom medzi väčším počtom skutočných parabol a zvyšujúcim sa počtom parabol, ktoré nesúvisia s dosvitom zelenej čiary, viď graf 11.

Ak by sme pre hľadania maxima použili iba jeden postup, tak riskujeme veľké systematické chyby dané napr. skutočnosťou, že fitujeme parabolou niečo, čo v skutočnosti parabola nie je. Boli preto vypracované tri postupy, ktorých úlohou je nájsť hraničné podmienky, pri ktorých bude väčšina parabol pochádzať z okolia maxima vyžarovania zelenej čiary. Graf 11 ukazuje hodnoty $x_{\max}$ pre tri



Graf 11 – *Graf ukazujúci rozloženie parabol s* $R^2 > 0{,}65$ *pre tri rôzne postupy.*

rôzne postupy, uvedené nižšie. Stále nachádzame veľa parabol rovnomerne rozprestrených pri výškach nad 125 kilometrov. Posunutím $R^2_{\min}$ z 0,85 na 0,65 bolo získaných veľa reálnych parabol medzi 110 a 120 km výšky (viď „diera“ v okolí snímky 9 a výšky 120 kilometrov).

Pre analýzu nájdenia maxima vypracované tri postupy:

- Maximum bolo určené ako fit s najvyššou hodnotou $R^2 \cdot \ln(N-3)$. Logaritmický člen mierne uprednostňuje fity s väčším počtom bodov, R^2 s nižším počtom bodov mierne rastie. Často sa stáva, že najlepší fit bol získaný z minimálneho počtu bodov, ale len o niečo horši fit bol nájdený nad násobne viacej bodmi. Význam člena $N-3$ je ten, že počet bodov N bol znížený o počet stupňov voľnosti fitu.
- Maximum bolo určené ako fit s najvyššou hodnotou $\ln(N-3)/(1-R^2)$. Tento fit uprednostňuje ale hodnoty s $R^2 \to 1$. Ak neexistujú systematické chyby, mal by dávať rovnaké výsledky ako predchádzajúci postup.
- Boli vybraté všetky fity, ktoré majú $R^2 > R^2_{\text{min.}}$. Ako výsledné maximum bola určená hodnota

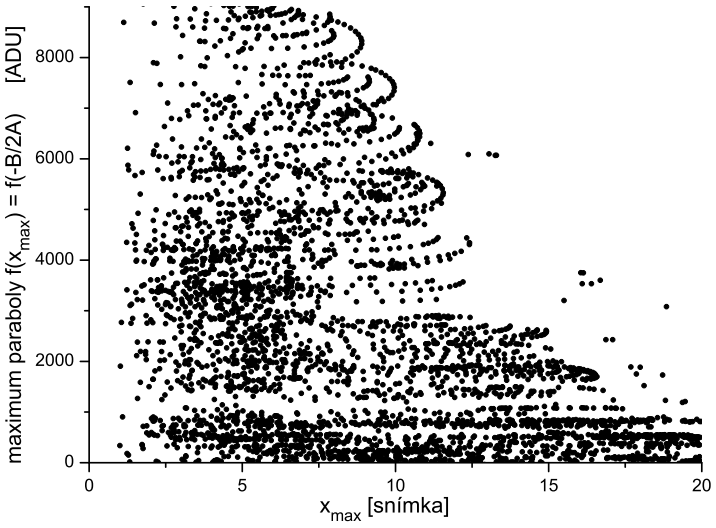
$$\langle x_{\max} \rangle = \frac{\sum R_i^2 x_{\max,i}}{\sum R_i^2} \,,$$

  Toto je vážený priemer všetkých výsledkov, ktoré spĺňajú podmienku $R^2 > R^2_{\text{min.}}$.

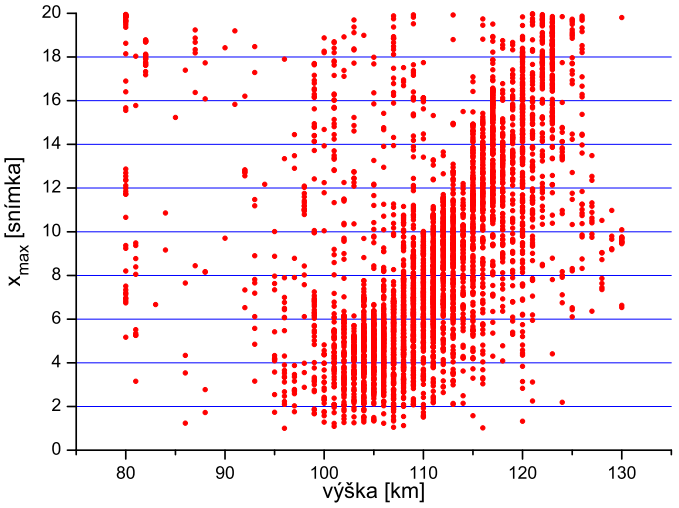
Bolo zistené, že prvé dva algoritmy trpia na preferenciu takých parabol, ktoré majú vysoké R^2. Pri pohľade na graf 10 je vidieť, že vysoké hodnoty R^2 majú iba rezy s výškami medzi 100 až 110 kilometrov. Z toho dôvodu sú tieto postupy mimo uvedené výšky nepoužiteľné. Z uvedených (aj neuvedených, ale použitých) postupov bol tretí algoritmus jediný, ktorý dával výsledky vo väčšom intervale výšok.

Na grafe 14 sú porovnané výsledky štyroch rôznych spôsobov – všetky dávajú podobné výsledky. Znamená to, že výsledky sú relevantné – numericky v poriadku a jediný problém může byť v použitom modele. Píky a dipy v dátach majú reálny základ v nameraných rezoch – napr. pík vo výške 110 km je spôsobený dodatočným zjasnením po prelete meteoru v spektre SZ2151 (rez 2151.110.PNG), ktoré generuje veľké množstvo parabol v maximami okolo 17.–18. snímky, viď graf 16.

Graf 15 ukazuje exponenciálny fit závislosti maxima paraboly na výške pre všetky paraboly. Jeho relevancia je vyššia ako relevancia lineárneho fitu ($R^2 = 0{,}98$ vs. $R^2 = 0{,}72$). Pre danú výšku boli do datasetu zvolené všetky paraboly

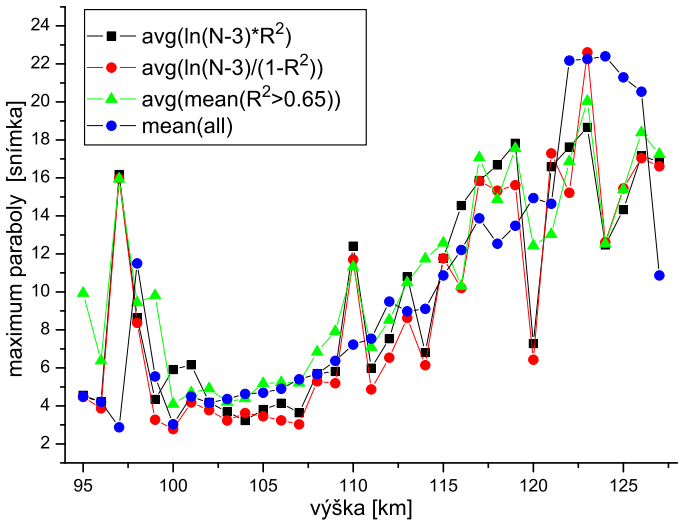


Graf 12 – *Graf ukazuje všetky paraboly s* $R^2 > 0{,}65$. *Všimnite si oblúkov na pravej strane. Tieto oblúky majú zväčša rovnakú krajnú ľavú snímku paraboly, a líšia sa krajnou pravou snímkou. Os y ukazuje výšku maxima paraboly (v ADU), os x polohu maxima paraboly* $x_{\max}$.

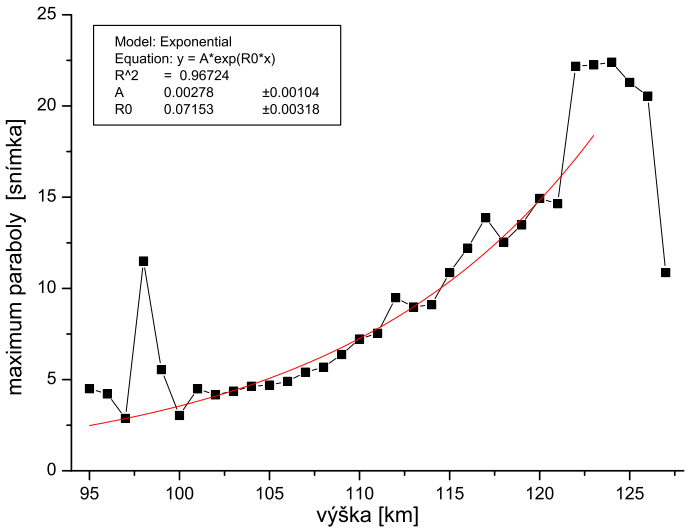


Graf 13 – *Porovnajte s grafom 11 vľavo. V* mean($R^2 > 0{,}65$) *je každý meteor zastúpený iba jedným bodom (priemerom všetkých parabol), v tomto grafe je použitá každá parabola spĺňajúca podmienku* $R^2 > R^2_{\min}$.

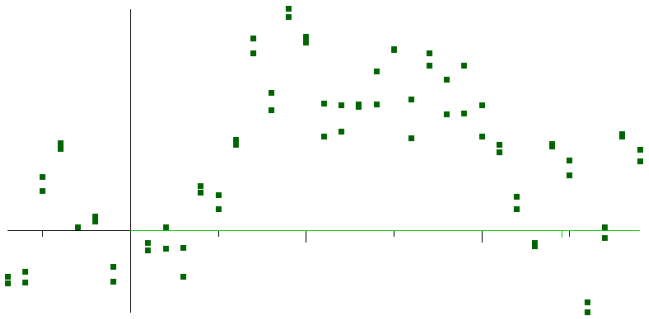
s $R^2 > R^2_{\text{min.}}$. Stredná hodnota nebola určená bežneou štatistikou, ale priamo z definície: nad histogramom (s delením $\sqrt{N}$ snímky, kde N je počet parabol v datasete) s danou výškou sme hľadali takú Gaussovu funkciu v lokálnom extréme, ktorá má najväčšiu plochu. Tým boli eliminované tie paraboly, ktoré vznikli náhodne a u ktorých je predpoklad rovnomerného rozdelenia. Častokrát bolo nájdených niekoľko vhodných Gaussových funkcií – najlepším sa vždy ukázal fit najbližšie k počiatku.



Graf 14 – *Porovnanie polohy maxima paraboly s výškou. Prvé tri postupy sú zhodné s grafom 11, kde je každý meteor zastúpený jedným bodom. U bodov* mean*(all) je naopak každá parabola zastúpená jedným bodom.*



Graf 15 – *Exponenciálny fit podľa rovnice (7) v intervale výšok 100–120 kilometrov.*



Graf 16 – *Časový rez spektra SZ2151 vo výške 110 kilometrov.*

4.6 Porovnanie výsledkov získaných rôznymi postupmi

Hodnotami na grafoch 15 bola preložená exponenciálna funkcia v tvare

$$x_{\max} = A \cdot \exp(R_0 \cdot h)\,, \tag{7}$$

kde h je výška. Porovnajme hodnoty získané jednotlivými postupmi:

	A	$\pm$	ΔA	R_0	$\pm$	ΔR_0	R^2	$H_{\text{krit.}}$
$\max(R^2)$	0,0013	$\pm$	0,0012	0,079	$\pm$	0,007	0,88	93
$\max(1/(1-R^2))$	0,00018	$\pm$	0,00016	0,095	$\pm$	0,007	0,91	98
mean()	0,004	$\pm$	0,003	0,069	$\pm$	0,006	0,89	90
err(vsetky paraboly)	0,0028	$\pm$	0,0010	0,072	$\pm$	0,003	0,97	92

Tabuľka 3 – *Hodnoty parametrov získané fitom podľa rovnice (7).*

Kritická výška $H_{\text{krit.}}$ je taká výška, pre ktorú vychádza $y = 2$ (Samotná štandardná odchýlka je nehodnoverná, keďže $\Delta A \ \rightarrow A$). Ak je kritická výška nižšie, potom pre zostupnú krivku paraboly máme maximálne jeden bod, čo je pre jej určenie príliš málo (pri minimálnom počte 7 alebo 8 bodov na fit). Malá zmena v hodnote jedného bodu nutne znamená veľkú chybu určenia parametrov paraboly. Táto hodnota je spodnou hranicou – v skutočnosti je kritická výška ešte vyššie než je uvedené. Z grafu 15 vyplýva, že kritická výška sa pohybuje niekde medzi 3–4 snímkami, čo zodpovedá výške okolo 100 kilometrov. V prípade, že by sme sa chceli dozvedieť viacej o oblasti pod 100 kilometrov, museli by sme zvýšiť snímkovaciu frekvenciu kamery. Približne na každých 5 kilometrov nižšie na dvojnásobok pôvodnej hodnoty.

5 Časové rezy – exponenciála

Okrem parabol bola urobená analýza časových rezov aj teoretickou funkciou

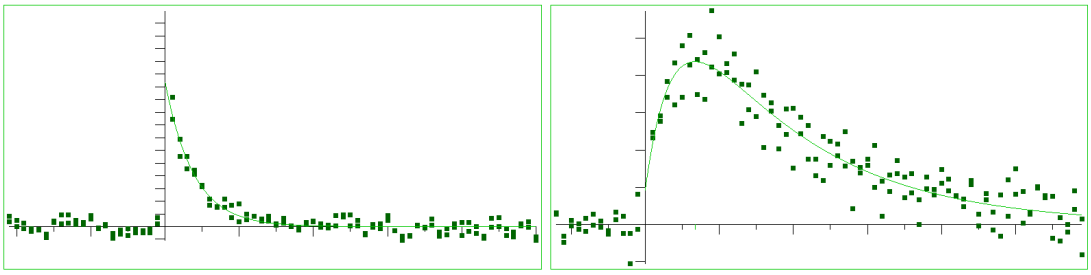
$$y(\mathrm{ADU}) = A \cdot \underbrace{\frac{1}{2}\left(\frac{|t|}{t}+1\right)}_{H} \cdot \underbrace{\left(1-\exp\left(-\frac{t}{F_{\mathrm{inc}}}\right)\right)}_{\mathrm{INC}} \cdot \underbrace{\exp\left(-\frac{t}{F_{\mathrm{dec}}}\right)}_{\mathrm{DEC}}, \tag{8}$$

kde H je Heavysideova funkcia, ktorá nadobúda hodnoty 1 pre kladné t a 0 pre t záporné. Časť INC popisuje predpokladaný exponenciálny pokles nárastu počtu vybudených atómov atomárneho kyslíka – predpokladáme homeostatickú energetickú rovnováhu. Časť DEC popisuje postupný pokles počtu excitovaných atómov, a to ako žiarivým tak elastickým prechodom.

Bol vyvinutý program `exp_2`, ktorý fitoval nameranými hodnotami rovnicu (8) pre každý časový rez gradientnou metódou.

Pri analýze bolo rozlišovaných niekoľko konečných stavov fitu. Program mohol po nastavenom počte iterácii (default 100 000) ukončiť aktuálny fit neúspešne, mohol si uložiť príznak (flag), podľa ktorého v určitom okamihu fixoval maximálnu hodnotu amplitúdy A a pokračoval vo fite, alebo ukončil fit úspešne ak dosiahol požadovaného minima. Počet jednotlivých fitov podľa týchto koncových stavov je nasledovný:

- 3744× skončil program na prekročení limitu počtu iterácií. Ten bol nastavený na default. Testovacie analýzy ukázali, že väčšina použitých fitov skončila s menej ako 20 000 iteráciami. Default hodnota bola nastavená tak, aby vysoko presahovala strednú hodnotu u bežného rezu.
- 231× bola fixovaná amplitúda A', ale nebol prekročený maximálny počet iterácií. Tento konečný stav bol zavedený z dvoch dôvodov. Aby sa zabránilo vzniku falošných fitov s vysokou hodnotou R^2, daných extrémne vysokou hodnotou jednoho bodu, a zároveň aby sa znížil počet iterácií potrebných k ukončeniu aktuálneho fitu. Počet iterácií bol často 47, 48, 88, 89, 90. Bolo to spôsobené občasným výskytom veľmi vysokej intenzity (kontinua samotného meteoru) na prvej snímke. Hodnota A' bola fixovaná tak, že maximálna funkčná hodnota funkcie (8) nemohla prekročiť dvojnásobok najvyššej hodnoty v datasete. V prípade, že fixácia nebola zavedená, dochádzalo k silnej korelácii A a F_{inc} v prípade vyskytu extrémnej hodnoty na prvej snímke.



Graf 17 – *Dva rezy, ktoré boli ďalej použité na analýzu. Patria spektru SZ1308. Rez vľavo vo výške 99 kilometrov a rez vpravo vo výške 111 kilometrov. Výstup z programu* `exp_2`.

- 3319× výpočet dobehol úspešne skôr, ako bolo dosiahnuté limitu počtu iterácií. Iba s týmito výsledkami sa ďalej pracovalo. Z toho 492× mal fit $R^2 > 0$, 158× mal fit $-1 < R^2 < 0$ a 212× $-2 < R^2 < -1$. Takmer všetky ďalšie analýzy vyžadovali $R^2 > 0$ – funkcia by mala vysvetľovať aspoň časť variability. Vo výnimočnom prípade, keď by sme použili nižšiu hranu, vyslovene upozorníme na tento fakt.

Grafickým výstupom programu je graf závislosti intenzity (v ADU) na čase (v snímkach), viď napr. graf 17. Na osi x je značka každých 5 a 10 snímiek, na osi y každých 500 ADU. V grafe je znázornená poloha maxima zelenej čiary podľa fitu daného rovnicou (8). Je taktiež vyznačená krivka najlepšieho fitu.

5.1 Porovnanie výsledkov získaných viacerými postupmi

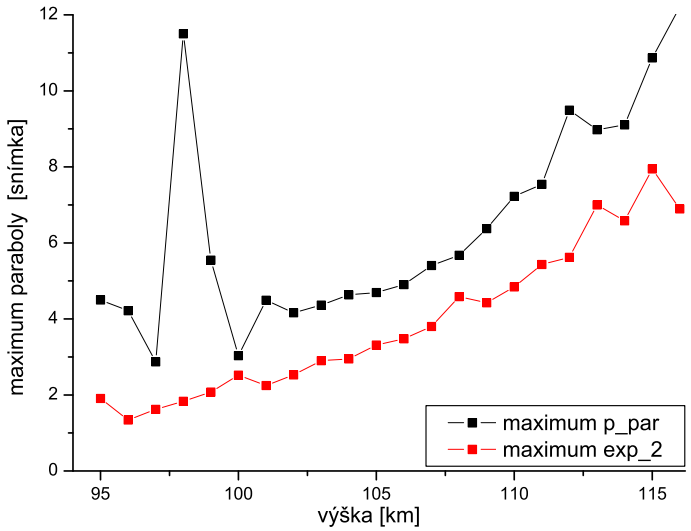
Pre okamih maxima intenzity zelenej čiary dostaneme z rovnice (8) vzťah

$$t_{max} = -F_{\text{inc}} \cdot \ln\left(\frac{F_{\text{inc}}}{F_{\text{inc}} + F_{\text{dec}}}\right) , \tag{9}$$

$$I(t_{max}) = A \ \cdot \frac{F_{\text{dec}}}{F_{\text{inc}}} \cdot \left(1 + \frac{F_{\text{dec}}}{F_{\text{inc}}}\right)^{\frac{F_{\text{dec}}}{F_{\text{inc}}}} , \tag{10}$$

alebo po substitúcii $\phi = \dfrac{F_{\text{dec}}}{F_{\text{inc}}}$

$$I(t_{max}) = A \ \cdot \phi \cdot (1 + \phi)^{\phi} . \tag{11}$$



Graf 18 – *Porovnanie výsledkov maxima paraboly a maxima zloženej exponenciály z rovnice (8).*

Na základe tohoto odvodenia môžeme porovnať hodnoty t_{max} získané z výstupu programu `p_par` a `exp_2`. Porovnanie je v grafe 18. Vidieť, že výsledky získané z `p_par` sú systematicky vyššie ako z programu `exp_2`. Je to spôsobené nízkou citlivosťou `p_par` na rýchly nárast intenzity zelenej čiary. Rovnako možno diskutovať o systematických chybách určenia F_{dec} v programe `exp_2`. Nie je jasné, kde sa systematická chyba presne nachádza. Pretože sme v programe `exp_2` používali celý dataset, a nie iba obmedzenú podmnožinu, budeme považovať jeho výsledky za hodnoverné.

5.2 Výsledky časových rezov

Závislosť amplitúdy zelenej čiary na výške

V grafe 19 vidieť nárast amplitúdy s narastajúcou výšku. Medzi 95–100 kilometrami existuje pík. Pravdepodobne sa jedná o nereálnu charakteristiku: koreluje s grafom závislosti F_{dec} a F_{inc} na výške (viď grafy 21 a 22). Ak by bola reálna, musí v rozmedzí výšok 95–10 dochádzať k esenciálne odlišnému procesu od toho, ktorý je zodpovedný za žiarenie nad 100 kilometrov.

Nad 110 kilometrov je vysoký rozptyl hodnôt $I(t_{\max})$, viď graf 20. Medzi fitmi sa vyskytujú veľmi silné čiary (napr. SZ1113, SZ1175, SZ1196 alebo SZ1178), ktoré začínajú svietiť vo vysokých výškach. Tieto posunú priemer vyššie, ako v skutočnosti je. Počet slabších spektier, ktoré podstatne prispievajú k amplitúde vo výškach okolo 105 kilometrov, je tu nízky. Všimnite si veľký rozpyl, spôsobený menším počtom spektier a spomenutým vysokým počtom spektier veľmi meteorov začínajúcich veľmi vysoko.

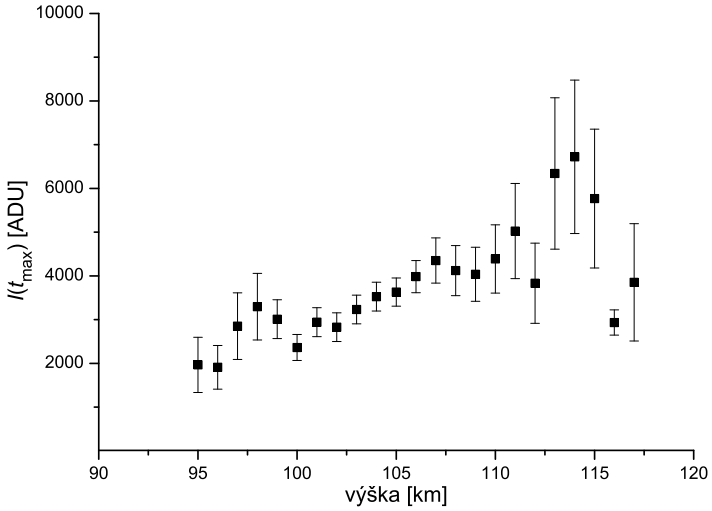
V oblasti 95–100 km nie je na prvý pohľad vidieť zvýšenie z grafu 19. Naznačuje to, že nárast hodnôt v grafoch 19, 21 a 22 je dôsledok nízkeho počtu fitov s nízkou amplitúdou a hodnotami F_{dec} a F_{inc} zodpovedajúcimi tejto výške. Čas maxima intenzity sa blíži hodnote, keď sa naľavo od neho nachádza príliš málo bodov na presné určenie F_{dec}

Závislosť F_{inc} a F_{dec} na výške

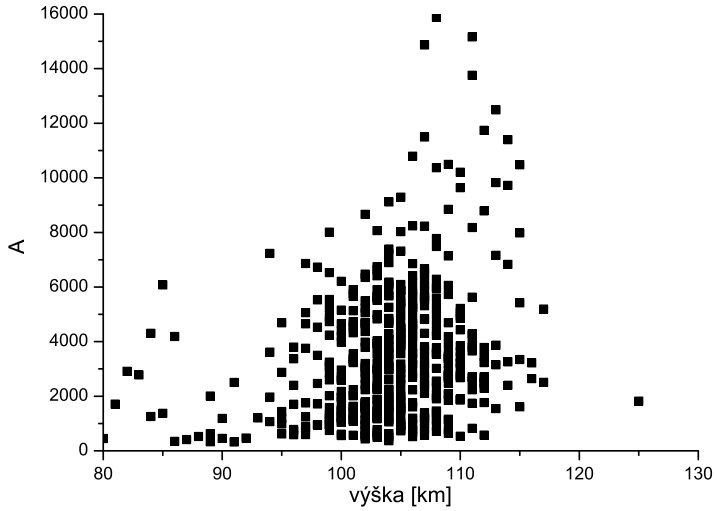
Všimnite si, že na rozdiel od 22 rastie hodnota F_{inc} aj tam, kde sa rast F_{dec} zastaví. Hodnoty nad 110 km majú veľký rozptyl. – V tomto prípade sa prejavuje, že niektoré veľmi jasné meteory v tejto výške len začínajú so svojou zelenou čiarou, zatiaľčo iné v nej majú maximum.

Veľmi dôležitý graf je 22, ukazujúci, že vo výškach nad 108 kilometrov nedochádza k zhášaniu prechodu $^1\mathrm{S}_0 \rightarrow {}^1\mathrm{D}_2$ zrážkami. Podľa modelu vo výškach nad 108 kilometrov stúpne stredná voľná dráha λ nad 5 metrov a počet zrážok n poklesne pod 60/s. Vo všetkých teoretických modeloch musíme dospieť k podobným okrajovým podmienkam.

Konštantným fitom v rozmedzí výšok 108–113 dospejeme k hodnote $y = 0{,}714 \pm 0{,}008$. Táto hodnota je prakticky zhodná s dobou života hladiny $\tau\ {}^1\mathrm{S}_0$. V grafe 22 je označená vodorovnou čiarou. Z hladiny $^1\mathrm{S}_0$ môže nastať žiarivý (zakázaný) prechod aj na hladinu $^3\mathrm{P}_1$ (doba života 14,9 s, viď tabuľka2). To je 5 % všetkých žiarivých prechodov. Po započítaní tohto efektu dostaneme pre strednú dobu života preskoku $^1\mathrm{S}_0 \rightarrow {}^1\mathrm{D}_2$ hodnotu $0{,}750 \pm 0{,}008$ s, čo je vo vynikajúcej zhode s 0,74 s podľa (Baggaley, 1976a).



Graf 19 – *Závislosť maximálnej jasnosti zelenej čiary na výške.*



Graf 20 – *Výška zelenej čiary vs. maximálna jasnosť. Jeden bod predstavuje jeden fit podľa rovnice (8).*

Pomer medzi F_{inc} a F_{dec}

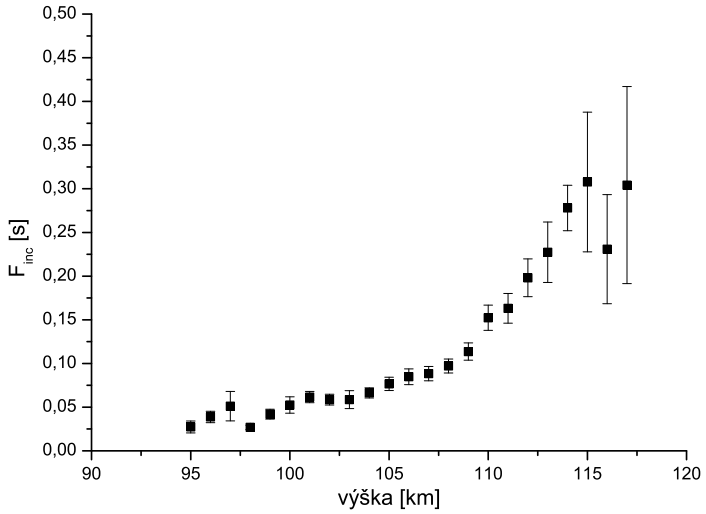
V grafe 23 vidieť porovnanie pomeru F_{dec} a F_{inc}. Vo výške 108 kilometrov dochádza k zastaveniu nárastu F_{dec}, ale F_{inc} naďalej rastie.

Lineárny fit ukazuje, že pre pomer F_{dec} a F_{inc} je konštantný, platí medzi nimi priama úmera. Ak je táto závislosť skutočná, tak sme dospeli k dôležitému zisteniu. Znamenalo by to, že rovnaký fyzikálny mechanizmus (poprípade chemický prekurzor) bude zodpovedný za vybudenie elektrónov na hladinu $^1\mathrm{S}_0$ aj za jej zhášanie.

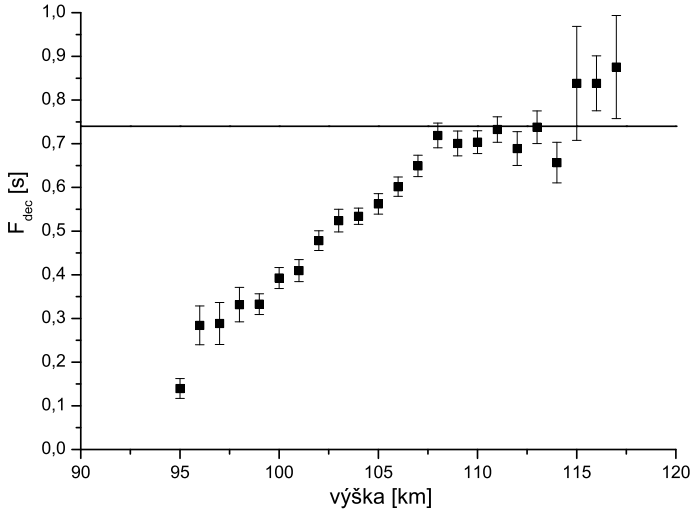
Pomer $F_{\mathrm{inc}}/F_{\mathrm{dec}} = 0{,}132 \pm 0{,}015$, ak zarátame aj prechod $^1\mathrm{S}_0 \rightarrow {}^1\mathrm{P}_3$.

Prežiarenie – SZ2199 a SZ1373

Niektoré meteory so zeleným spektrom sa správajú podstatne inak v nižších výškach (pod 95 kilometrov). Ukážeme si dva príklady. Na grafe 25 vidíme okrem bežných spektier dva neobvyklé meteory. U oboch meteorov bol problém s kon-



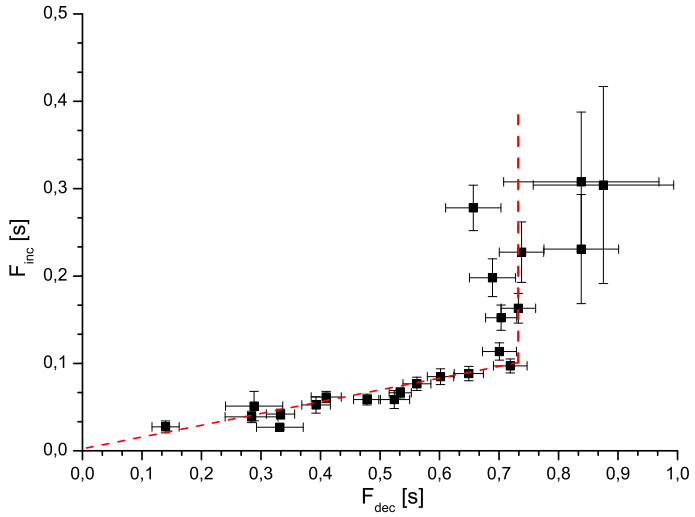
Graf 21 – *Závislosť ukazuje postupný nárast hodnoty F_{inc} s výškou.*



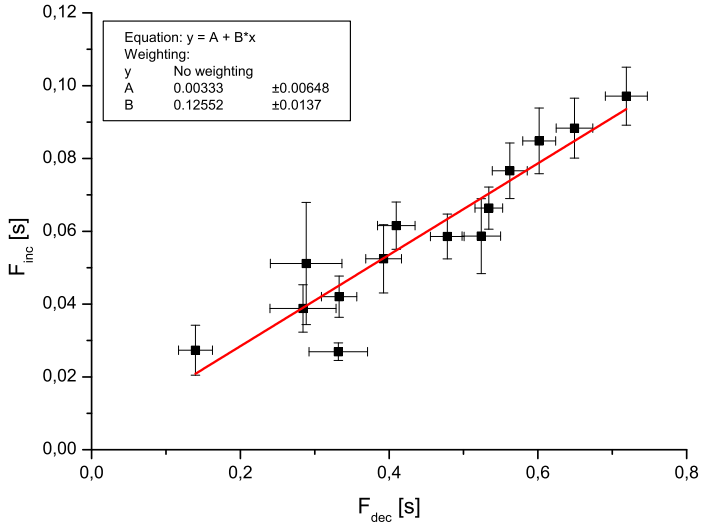
Graf 22 – *Závislosť ukazuje postupný nárast hodnoty F_{dec} s výškou.*

vergenciou. V prípade SZ2199 polovina hodnôt nedokonvergovala v konečnom čase, u SZ1373 dokonca všetky. Hodnoty F_{dec} sa ustálili už pri nízkom počte iterácií a problém s konvergenciou mala iba F_{inc}. Všimnite si vyčnievajúcu hodnotu SZ2199 vo výške 95 km. Hodnota je reálna, fit dobehol po 1327 iteráciach. Pozadie ale nie je dobre definované, medzi 20. a 40. snímkom je prepad intenzity dokonca pod stredný jas oblohy (graf 28, výška 95 km). Geocentrická rýchlosť meteoru SZ2199 je 22,6 km/s, maximálna absolútna jasnosť -1 mag.. Je to teda pomalý meteor, s normálnou zelenou čiarou, viď kapitola 8. Spektrum SZ1373 patri Perzeide, ktorá skončila výbuchom vo výške 80 kilometrov. Jej maximálna absolútna jasnosť je -9 mag.. V tomto prípade sa jedná o mimoriadnu čiaru. Zatiaľčo SZ2199 má hodnoty F_{dec} ako by sme očakávali, hodnoty SZ1373 kolíšu okolo 0,15. Porovnaj s grafom 85.

Hodnoty F_{dec} u SZ1373. sa líšia od hodnôt, ktoré boli očakávané z extrapolácie krivky bežných spektier – sú vyššie. Jedno z vysvetlení je *prežiarenie* oblohy. V grafe 28 vo výškach 90–95 kilometrov nastáva nárast zelenej čiary už niekoľko snímiek pred meteorom (ktorý je z obrázku vyrezaný). Vo výške 95 kilometrov je to dokonca 5 snímiek. Rýchlosť meteoru je 23 km/s. To znamená, akoby zelená



Graf 23 – *Vzájomná závislosť* F_{dec} *a* F_{inc}.

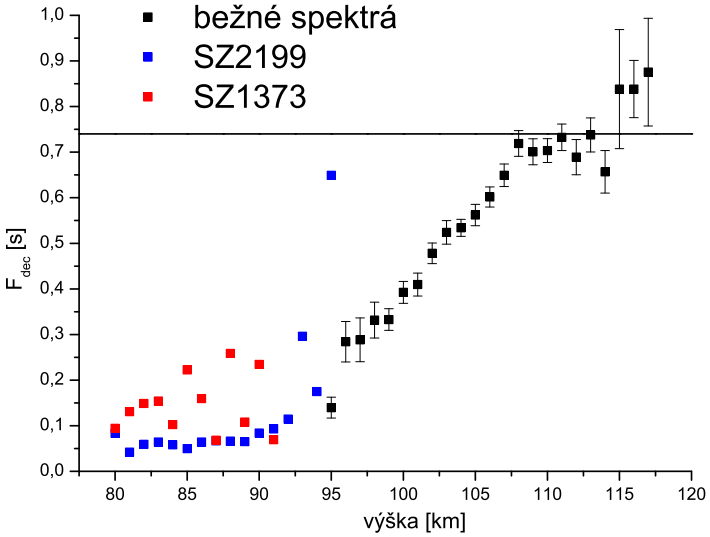


Graf 24 – Lineárny fit závislosti F_{dec} *a* F_{inc} *vo výškach pod 108 kilometrov.*

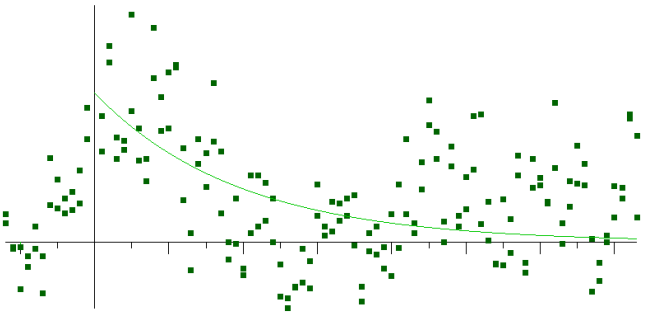
čiara začínala v tomto prípade žiariť už 5 kilometrov pred samotným preletom meteoru. Podobný priebeh vykazuje aj SZ1373.

S najväčšou pravdepodobnosťou je prežiarenie spôsobené osvetlením oblohy, zvýšením jasu pozadia. V grafe 27 sú nanesené zelená čiara a dublet sodíka 587 nm pre okamih výbuchu meteoru a pre okamih, keď meteor už neexistoval. Po ukončení žiarenia meteoru nepozorujeme pred meteorom žiaden náznak zelenej čiary ani sodíkového dubletu. Za meteorom zostala zelená čiara, ale sodík prítomný nie je. Sklon poklesu sodíka pred a za meteorom je rôzny. Ak by bolo prežiarenie spôsobené osvetlením oblohy, očakávali by sme na obe strany rovnaký sklon.

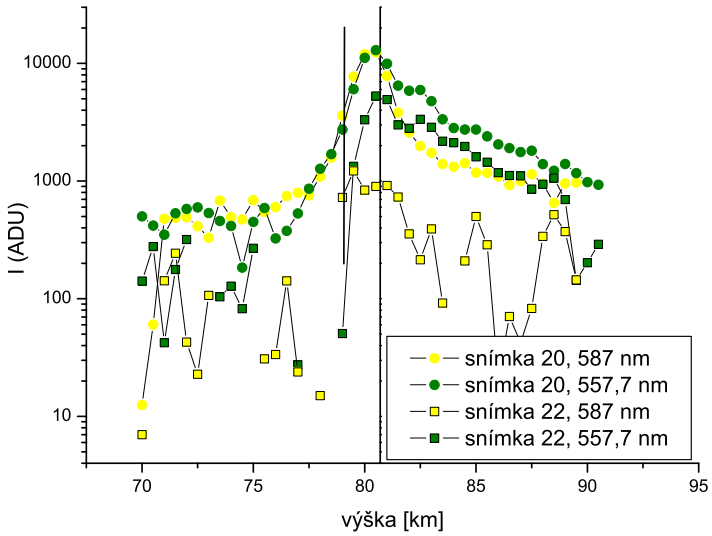
Ďalšími spektrami, u ktorých bolo prežiarenie pozorované, sú napr. SZ1113 (112–107 km), SZ1203 (104 km) alebo SZ1311 (112–107 km).



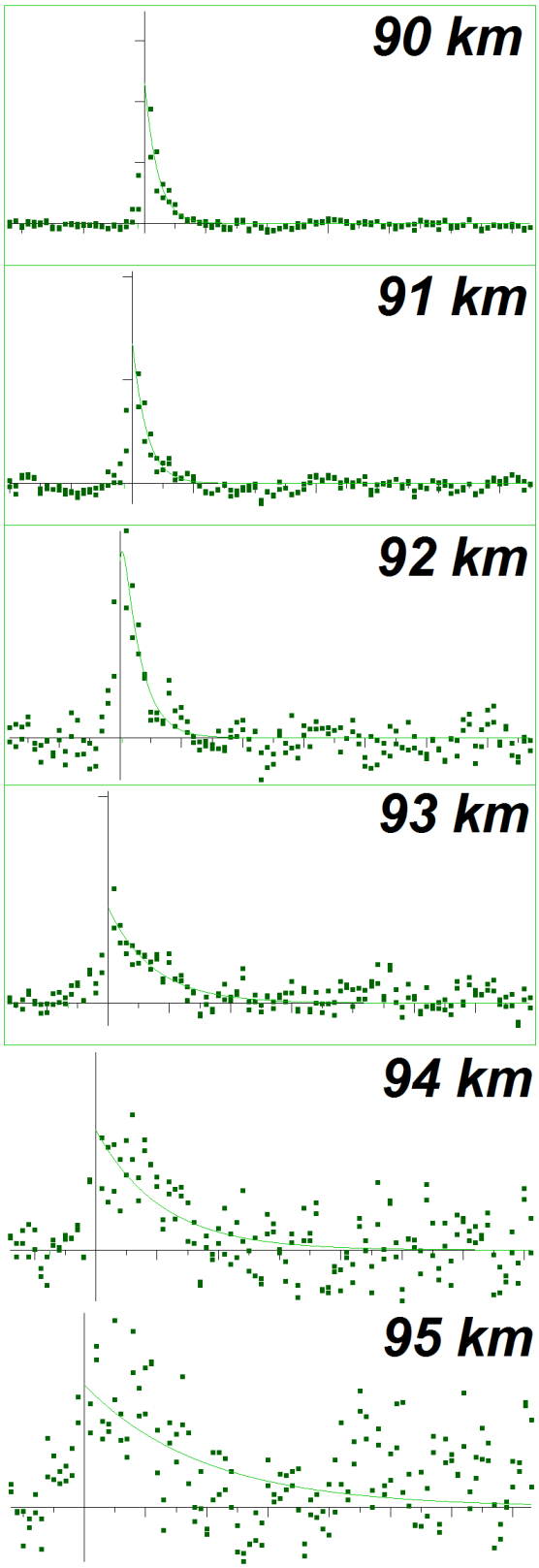
Graf 25 – *K bežným spektrám sme pridali dva meteory žiariace v nižších výškach.*



Graf 26 – *Časový rez SZ2199 vo výške 95 kilometrov.*



Graf 27 – *Prežiarenie u spektra SZ1373. Na snímke 20 bol pozorovaný výbuch meteoru, na snímke 22 už meteor neexistoval.*



Graf 28 – *Graf časových rezov spektra 2199 v rozmedzí výšok 90–95 kilometrov. V prípade, že riešenie dokonvergovalo, má okolo seba zelený rámec.*

5.3 Časové rezy – exponenciála + shift

Namiesto rovnice (8) bola použitá rovnica

$$y = \frac{1}{2}\left(\frac{|t+\text{shift}|}{t+\text{shift}}+1\right)\cdot H\cdot\left(1-\exp\left(-\frac{t+\text{shift}}{F_{\text{inc}}}\right)\right)\cdot\exp\left(-\frac{t+\text{shift}}{F_{\text{dec}}}\right) \quad (12)$$

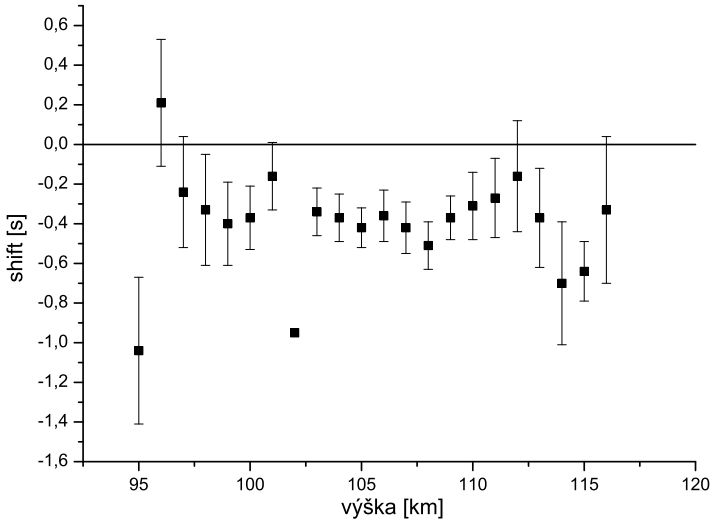
Úlohou tejto rovnice je nájsť prípadné odchylky od nulovej hodnoty začiatku zelenej čiary.

Pri analýze sme použili 2784 fitov, ktoré dokonvergovali postupom spomenutým na strane 41. Z nich sme vybrali tie, ktoré mali R^2 kladné, 350 fitov. Závislosť shift na výške možno vidieť na grafe 29. Ak odstránime 3 krajné body na oboch koncoch, dostaneme pre strednú hodnotu shift $= -0{,}37 \pm 0{,}04$.

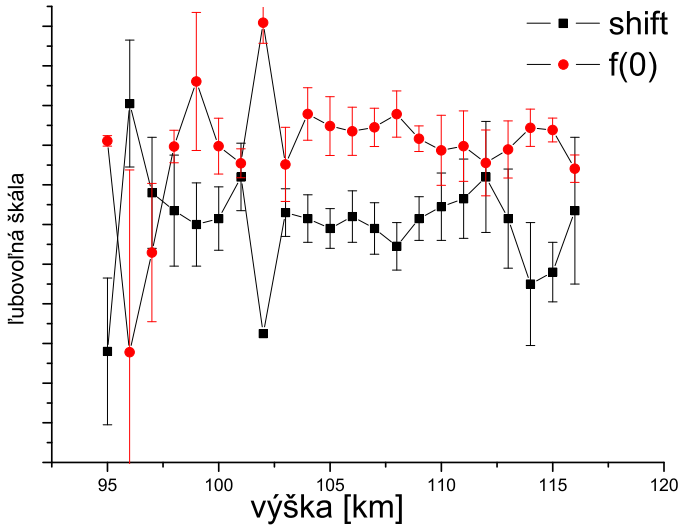
Tento posun môže mať niekoľko príčin:

- Môže ho spôsobovať uvedený prežiarením.
- Teoretická závislosť môže byť chybná, rovnica (12) nesprávne vystihuje namerané dáta a systematická chyba sa prejaví posunom nulového bodu.
- Numerický model je problémový, konverguje k istej hodnote vďaka fiktívnej korelácii dvoch veličín spôsobenej nevhodnou funkciou (pri reškálovaní do iného priestoru by sme dostali správne výsledky).
- Posun spôsobuje presah kontinua niektorých meteorov do snímky 1. Ten zvýši hodnotu intenzity na snímke 1, a to má za následok systematický nulového bodu funkcie.

Najvhodnejším vysvetlením sa javí prežiarenie a presah kontinua meteoru na snímku 1.

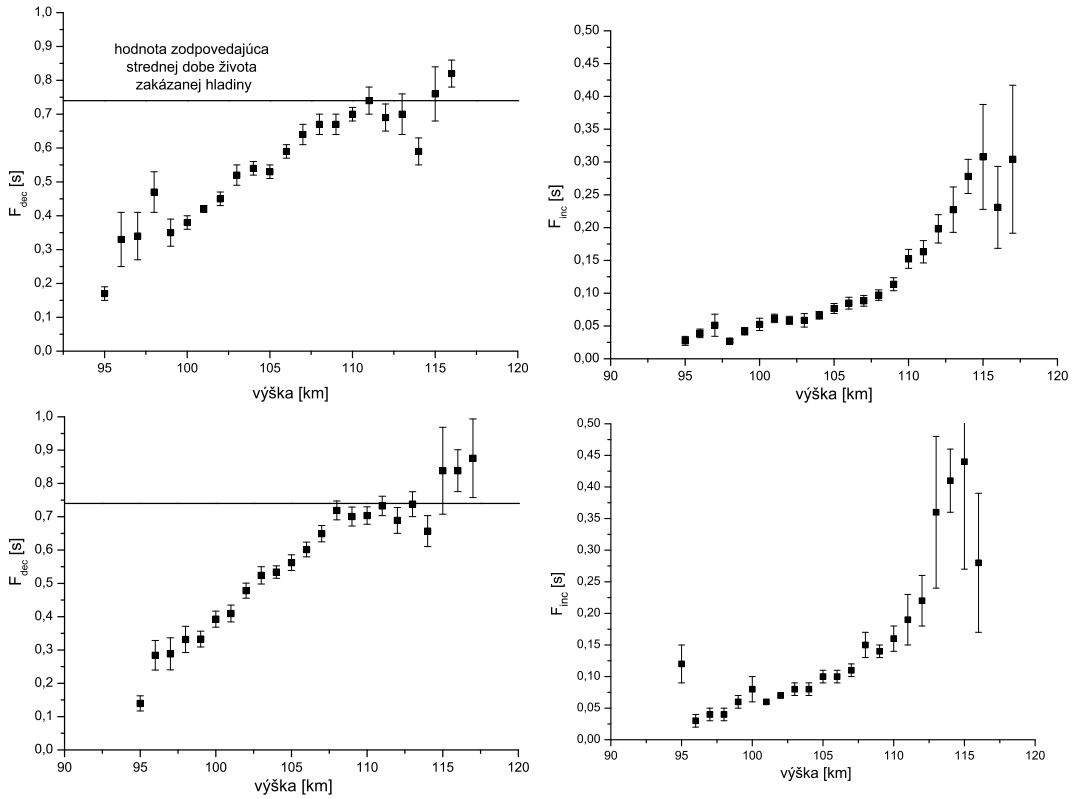


Graf 29 – *Graf ukazuje posun nulového bodu funkcie (shift) (12) v závislosti na výške. Posun nevykazuje žiaden trend s výškou.*

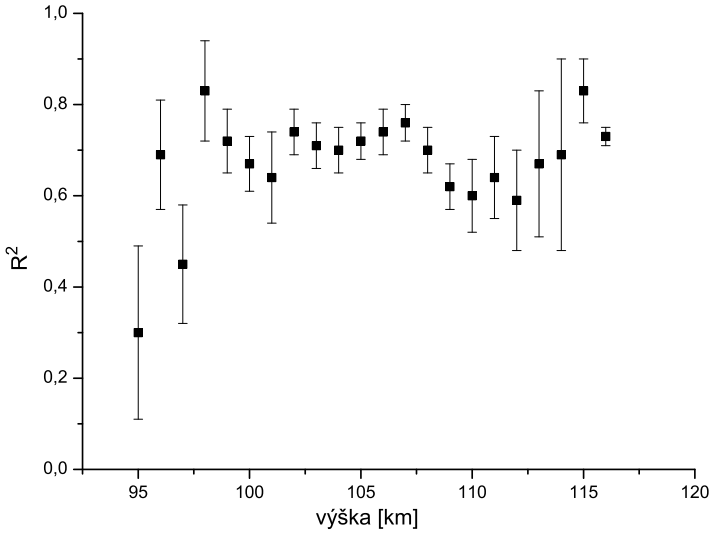


Graf 30 – *Korelácia medzi posunom nulového bodu a funkčnou hodnotou v bode 0. Hodnoty $f(0)$ ani shift nevykazujú s výškou žiaden trend. Prípadné odchylky navzájom korelujú: shift = const. $\cdot$ $f(0)$.*

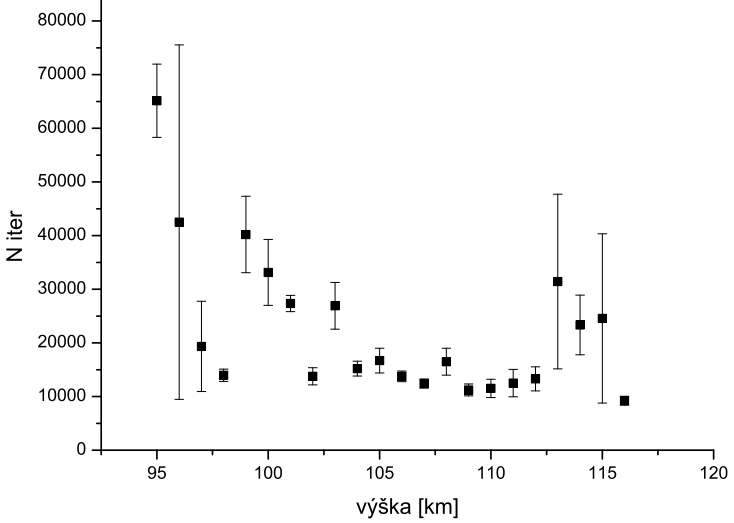
5.4 Porovnanie výsledkov programov SHIFT a exp_2



Graf 31 – *Porovnanie výsledko získaných z programov* `SHIFT` *a* `exp_2`*. Všimnite si, že riešenia sa od seba príliš prakticky nelíšia. Horný riadok sú výsledky* `exp_2`*.*



Graf 32 – *Závislosť R^2 na výške. Z grafu vidieť, že od výšky 98 kilometrov vyššie sú riešenia hodnoverné.*



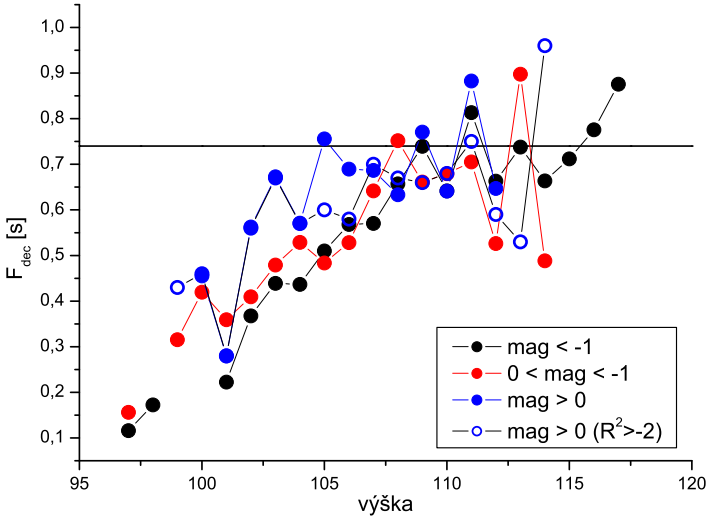
Graf 33 – Stredný počet iterácií v závislosti na výške. Je vidieť, že nad 112 kilometrov už riešenia horšie konvergujú – to má vplyv na kvalitu dát v grafoch 21 a 22.

5.5 Diskusia s publikovanými prácami

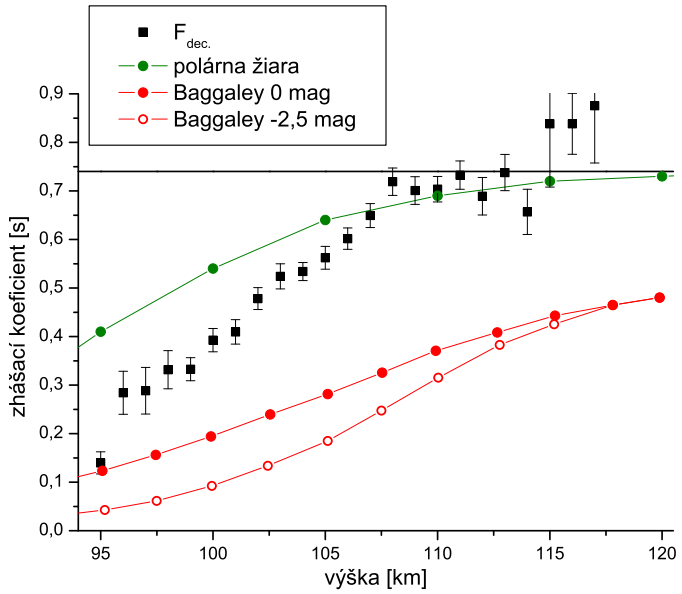
Porovnajme graf 22 s grafom Fig. 2 v práci (Baggaley, 1976b). Baggaley v nej teoreticky predpovedá, že vo výške 120 kilometrov bude 30 % všetkých prechodov emisie zelenej čiary zhášaných. Vo výške 110 kilometrov pre meteory s magnitúdou 0 a nižšou minimálne 50 %. Podľa našich výsledkov ale k žiadnemu zhášaniu nedochádza, viď graf 22.

V tej istej práci predpokladá, že zhášanie je úmerné magnitúde meteoru. Ak si z našich dát vynesieme do grafu 34 Leonidy a rozdelíme ich do troch skupín, tak iba najslabšie meteory vykazujú znížený hodnotu zhášania. Môže to byť ale spôsobené výberovým efektom, pri ktorom program uprednostní fity, ktoré majú vyššie hodnoty F_{dec}. Ak pridáme do tejto skupiny 36 fitov ďalších 26, ktoré majú $-2 < R^2 < 0$, tak sa fit vo výškach nad 105 kilometrov podstatne zlepší. Avšak ani toto povolenie kritérií nepridá ďalšie riešenia pod 105 kilometrov. F_{inc} je

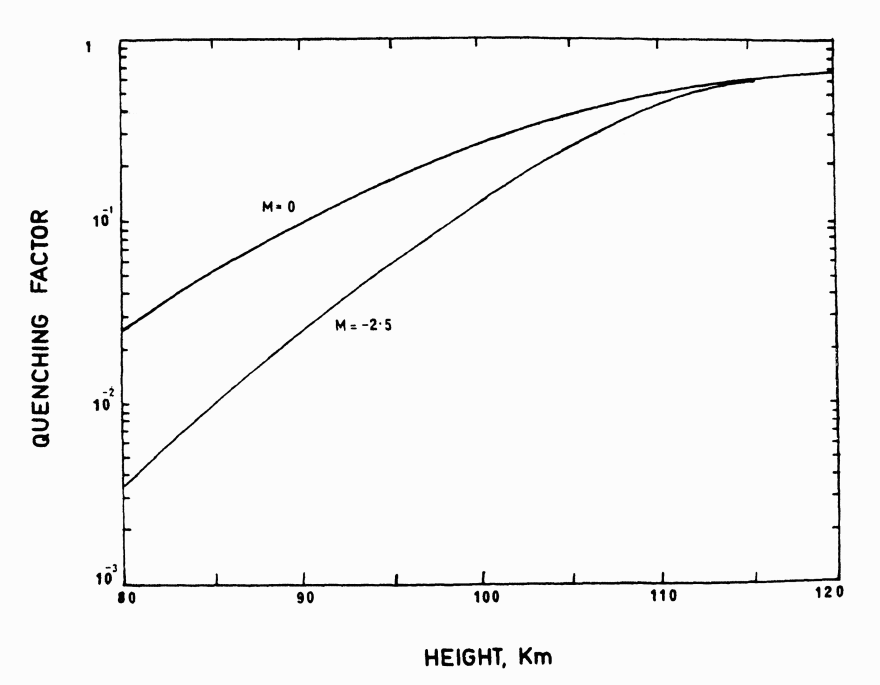
príliš malá aby sme získali rozumné výsledky. Možno sa teda domnievať, že zhášanie sa s jasnosťou meteora nemení, čo je v rozpore s teoretickým predpokladom v práci (Baggaley, 1976b).



Graf 34 – *Porovnanie hodnôt F_{dec} jednotlivých skupín meteorov.*



Graf 35 – *Porovnanie F_{dec} s zhášaním polárnej žiary podľa článku (Moore, 1971), autori použili model atmosféry CIRA 65. Zhášací koeficient nesúhlasí s Baggaleyom (Baggaley, 1976b), ani s výsledkami tejto práce.*



Graf 36 – *Graf zhášania zelenej čiary z pôvodnej práce (Baggaley, 1976b).*

6 Integrálna intenzita

motto: Je treba rozlišovať medzi výsledkom a zbožným želaním.

Budeme sa zaujímať o množstvo fotónov, ktoré sa uvoľnia v jednotlivých fázach letu meteoru. Môžeme ho vyjadriť napríklad v percentách uvoľnenej energie v svetelnom obore. Ak poznáme v danej výške jasnosť meteoru a účinnosť premeny kinetickej energie na svetelnú, potom môžeme odhadnúť minimálny priemer excitovanej trubice a porovnať ju s teóriou. Rovnako môžeme hľadať parametre zostupnej a nástupnej hrany a skúmať, či číselne spolu súvisia, aký je pomer oboch parametrov atď. Tiež môžeme porovnávať parametre teoretickej krivky, popisujúcej nárast a pokles intenzity s výškou – medzi sebou aj s ďalšími parametrami popisujúcimi meteor, ako napr. maximálna intenzita alebo parameter K_B (viz str.).

Integrálnou intenzitou budeme rozumieť celkovú intenzitu vyžiarenú v zelenej čiare v danom výškovom intervale, sumovanú cez všetky snímky. Pre názornosť ju budeme uvádzať v ADU (analog-digital unit). Prepočet na intenzitu a energiu v SI spočíva v prenásobení multiplikatívnou konštantou. Pre účely našej analýzy boli použité iba tie spektrá, kde sa celá (alebo takmer celá) zelená čiara nachádza v zornom poli spektrálnej kamery. Takých spektier bolo 157.

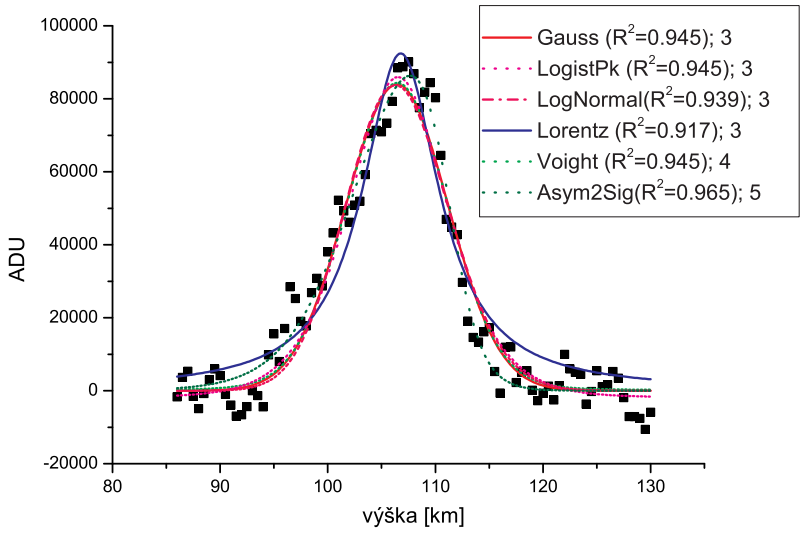
6.1 Teoretický tvar závislosti nárastu a poklesu integrálnej intenzity

Ak sa pozrieme na svetelné krivky slabších meteorov, viď napr. prácu (Štork, 2002) tak zistíme, že meteory ju nemajú symetrickú. U jasných meteorov býva symetrickosť ešte horšia, často sa u nich objavujú prudké zvýšenia intenzity. V rôznych častiach svojej dráhy vydávajú rôzne množstvo energie a ionizovaný stĺpec vzduchu dosahuje rôznej šírky. Dá sa predpokladať, že ani svetelné krivky zelenej čiary nebudú symetrické. Ukázalo sa, že veľká časť z nich sa dá popísať symetrickou funkciou a rozdielne sklony nástupnej a zostupnej hrany majú iba stopy veľmi jasných meteorov.

6.2 Hľadanie „ideálnej funkcie“

Zoberme si graf integrálnej intenzity zelenej čiary v závislosti na výške, viď napr. graf 37 (meteor SZ1308). Skúsme sa zamyslieť, aké informácie môžeme získať jeho analýzou.

Ako bude vyzerať funkcia popisujúca graf 37? Graf vyzerá hladko a symetricky. Má výrazné maximum (nejedná sa ale o priemernú vzorku, ide o jednu z najlepších). Ponúka sa preto možnosť preskúmať, ako sa uplatnia fity rôznych funkcií na danej vzorke. Na začiatok predpokladajme, že o pôvode dát nevieme nič, že ich fyzikálny význam nepoznáme. Vyberme si preto funkcie najčastejšie používané pri analýze dát, a porovnajme ich výsledky.



Graf 37 – *Porovnanie fitov rôznych funkcií integrálnou intenzitou spektra SZ1308. Popisky značia v poradí fitovanú funkciu, koeficient determinácie a počet voľných parametov funkcie.*

Z 30 funkcií bolo vybraných šesť pre ďalšiu analýzu. Vybrané boli tie, ktoré obsahovali malý počet parametrov a popisovali vhodne experimentálne dáta (t.j. v $x \to \infty$ a $x \to -\infty$ sa hodnota $f(x) \to 0$ a korelácia sa príliš nelíšila od korelácie najlepšieho fitu). Vďaka tomu, že je šum pozadia u zvoleného meteoru malý, dosahovali vysokej zhody s experimentálnymi dátami.

Pri hľadaní najlepšej funkcie sa často používa R^2 – zo všetkých funkcií sa vyberie taká, ktorá má *koeficient determinácie* R^2 najvyšší. Pri použití rovnakej funkcie na rôzne dáta je tento postup väčšinou správny. Pokiaľ máme iba jednu množinu dát, a meníme fitujúcu funkciu, musíme použiť inú metódu. Treba zistiť, aká funkcia bude popisovať namerané dáta čo najlepšie s ohľadom na to, čo o dátach vieme. Budeme brať do úvahy nielen matematickú, ale aj fyzikálnu interpretáciu voľných parametrov funkcie. Taktiež je dôležité zaujímať sa o ich počet.

Funkciám vždy zafixujeme parameter $y_0 = 0$. Odstraní sa tak voľný parameter. Je všeobecne známe, že zvyšovanie počtu voľných parametrov síce zvýši R^2, ale v prípade nefyzikálneho významu vstupných parametrov budú výsledné fity popisovať fyzikálny stav horšie. Snahou je mať čo najnižší počet týchm ktoré sú fyzikálne zmysluplné. Z toho dôvodu môžno zamietnuť *asymetrický dvojito sigmoidálny (Asym2Sig)* fit. Má síce najlepšie R^2, ale príliš veľa parametrov. Naviac, nemáme pre neho fyzikálne opodstatnenie (čo ale nutne neznamená, že nemusí neexistovať).

Zoberme si ďalej *log-normal* a *logistický* fit. Oba zamietneme z fyzikálneho dôvodu – nie je dôvod domnievať sa že nejaká veličina pri letu atmosférou má log-normálne alebo logistické rozdelenie. U veličín ako rýchlosť, hmotnosť či teplota nepredpokladáme závislosť $\propto \ln x$. Logistické rozdelenie je pre fitované dáta prakticky totožné s Gaussovym rozdelením, vo fyzike sa ale používa podstatne menej.

$$y_G = y_0 + A \cdot \exp\left(-\left(\frac{x - x_c}{\sqrt{2}w}\right)^2\right)$$

$$y_{Lp} = y_0 + \frac{4A \cdot \exp\left(-\dfrac{x - x_c}{w}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\dfrac{x - x_c}{w}\right)\right)^2}$$

$$y_{Ln} = y_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi}wx} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\ln\dfrac{x}{x_c}\right)^2}{2w^2}\right)$$

$$y_L = y_0 + \frac{2A}{\pi} \cdot \frac{w}{4(x - x_c)^2 + w^2}$$

$$y_V = y_0 + A \cdot \frac{2\ln 2}{\pi^{3/2}} \cdot \frac{w_L}{w_G^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-t^2)\mathrm{d}t}{\left(\sqrt{\ln 2}\dfrac{w_L}{w_G}\right)^2 + \left(\sqrt{4\ln 2}\dfrac{x - x_c}{w_G} - t\right)^2}$$

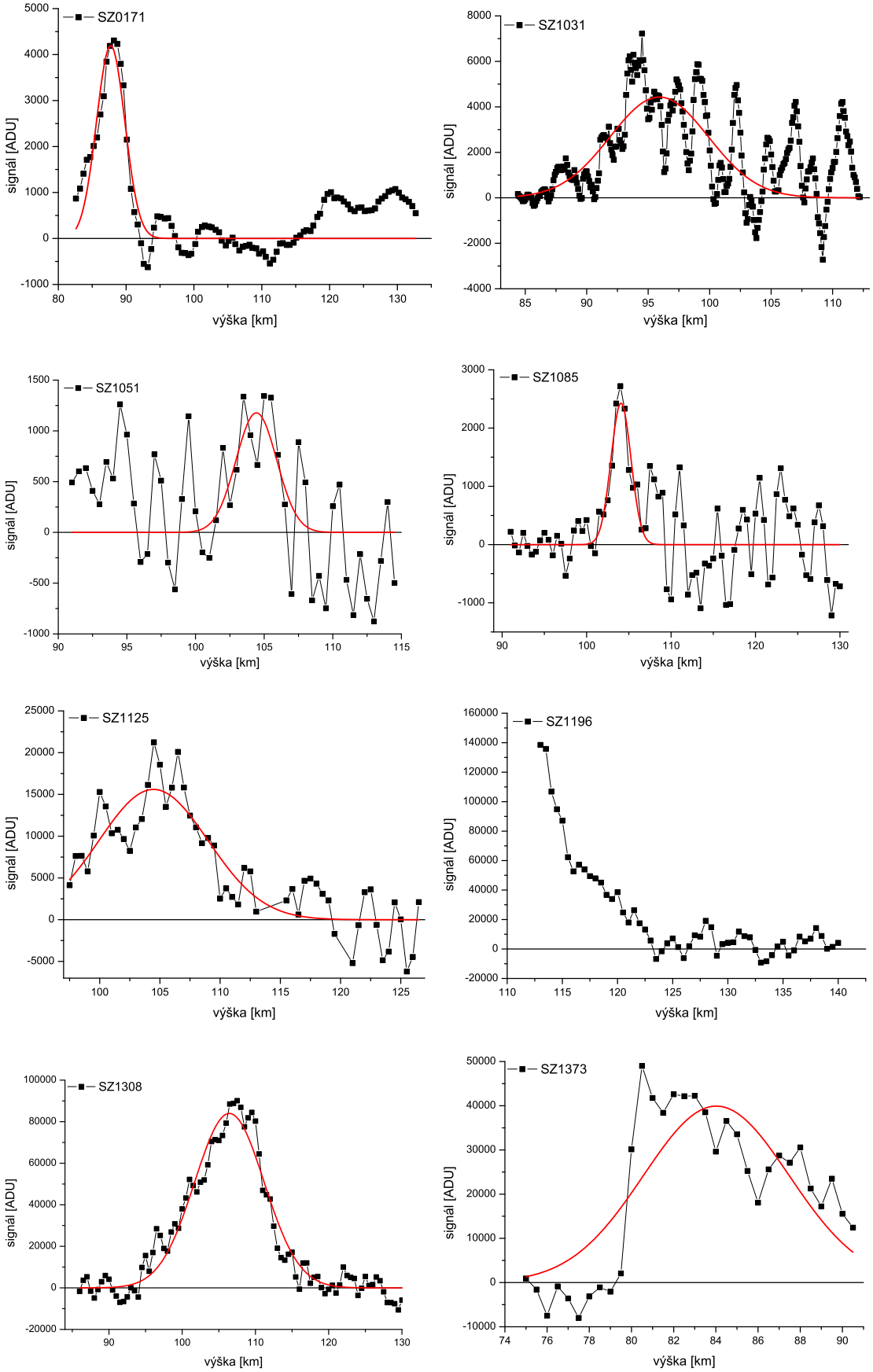
$$y_{A2\sigma} = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + \exp\left(-\dfrac{x - x_c + \frac{w_1}{2}}{w_2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \exp\left(-\dfrac{x - x_c - \frac{w_1}{2}}{w_3}\right)}\right)$$

Tabuľka 4 – *Zoznam použitých funkcií: Funkcie y_G – Gaussova; y_{Lp} – logistická; y_{Ln} – log-normálna; y_L – Lorentzova; y_V – Voightova a $y_{A2\sigma}$ – asymetrický dvojito sigmoidálna. Symetrickými funkciami sú y_G, y_L a y_V. Zvyšné tri funkcie sú síce nesymetrické, ale v našom prípade sa ich nesymetria nebude prejavovať.*

Voightovo rozdelenie je zložením dvoch rozdelení – Gaussovho a Lorentzovho. Jeho použitie by malo význam vtedy, ak by sme predpokladali dva fyzikálne mechanizmy, ktoré produkujú spomenuté rozdelenia. Toto sa ale zdá nepravdepodobné, je jednoduchšie uvažovať že za tvarom krivky stojí iba jeden mechanizmus. Znížime tým počet voľných parametrov.

Zostali už len dve rozdelenia, pričom obe sa vo fyzike často používajú. Pri porovnávaní týchto fitov boli rozpoznané nasledujúce charakteristiky:

- Pri redukcii funkcí o 1 parameter (fixujeme $y_0 = 0$) nastal u Lorentzovho rozdelenia podstatne výraznejší pokles R^2 ako u Gaussovho (všeobecne pomer prepadov $\Delta R^2_{\mathrm{L.}}/\Delta R^2_{\mathrm{G.}} > 10$).
- Pri uvoľnení y_0 vychádzali u Lorentzovho rozdelenia jeho hodnoty záporné a v absolútnych číslach niekoľkonásobne vyššie ako u Gaussovho rozdelenia.
- Pri zbežnom pohľade na teoretickú krivku fitu sa krídlo píku (Lorentz) vždy nachádzalo pod teoretickou krivkou.
- Korelácia u Gaussovej funkcie bola vždy vyššia ako u Lorentzovej funkcie. Hodnoty R^2 oboch fitov sa správali podobne ako na uvedenom príklade v grafe 37.



Graf 38 – *Príklady integrálnych intenzít spektier. Niektoré spektrá popisuje Gaussova funcia veľmi dobre, niektoré (ako napr. SZ1373) horšie.*

Z uvedených skutočností vyplýva, že funkciou, ktorá bude lepšie popisovať experimentálne dáta, je Gaussova funkcia:

$$y = y_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_c)^2}{2w_c^2}\right) . \tag{13}$$

Je možné namietať, že pri iných spektrách budú výsledky iné. Boli analyzované aj ďalšie podobne kvalitné spektrá a všetky dávajú kvalitatívne rovnaké výsledky. U všetkých je najlepším fitom asymetrický dvojito sigmoidálny. U všetkých Voightova funkcia popisuje dáta lepšie ako Gaussova alebo Lorentzova. A u zvyšných štyroch nie je možné na prvý pohľad odlíšiť tieto fity navzájom. Pozorovania, ku ktorému sme dospeli u meteoru SZ1308, platia aj pre zvyšné meteory.

Iný spôsob hľadania „ideálnej funkcie“

Tento spôsob je menej teoretický a viacej praktický. Ak nie je známy tvar rovníc popisujúcich daný problém a sú k dispozícii iba empirické dáta, v praxi sa veľmi často použije normálové rozdelenie. môžeme ho použiť aj my?

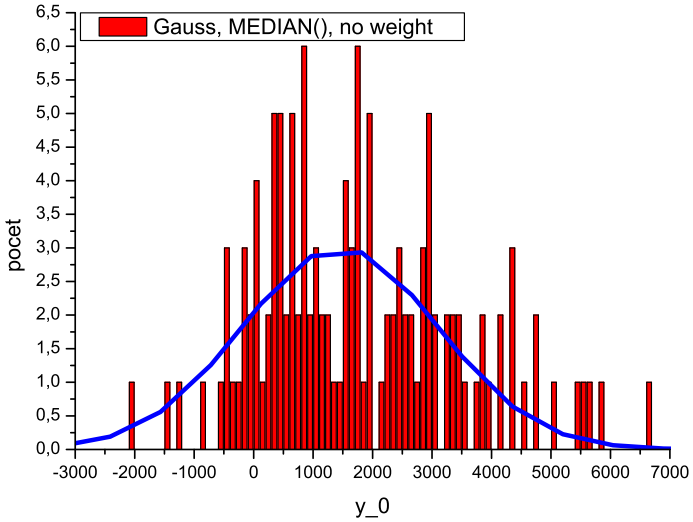
Teoreticky nepoznáme tvar krivky. Našim cieľom je popísať nameraný pík vhodnými parametrami. Takými parametrami sú šírka a výška píku a poloha maxima. To sú tri parametre, každá funkcia s nižším počtom parametrov nedokáže pík popísať. Gaussova funkcia má tri parametre. Ak sa pík aspoň trošku podobá Gaussovej funkcii, tak je vhodné ju použiť. Uvedené parametre píku nepotrebujeme počítať z parametrov fitu – sú totiž číselne identické. A v našom prípade sa pík Gaussovej funkcii podobá.

6.3 Aká je skutočná hodnota y_0?

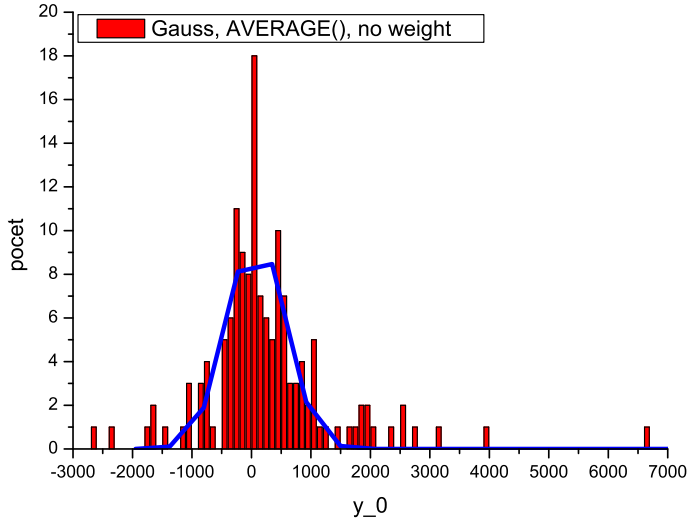
Pozadie čistej oblohy dáva nenulový signál na výstupe kamery. V závislosti na hodnote zosilnenia zosiľňovača (image intensifier) zodpovedá dopadajúci fotón inej výstupnej ADU. Pri redukcii je treba nájsť intenzitu pozadia a odpočítať ju od nameraných hodnôt zelenej čiary.

Ukázali sme, že vhodným kandidátom na popis píku bude Gaussova funkcia. Pre nasledujúcu analýzu bola použitá v amplitúdovom tvare (13). Všetky spektrá, u ktorých bolo celé maximum žiarenia zelenej čiary v zornom poli, boli usporiadané do histogramu a fitované funkciou (13) troma rôznymi spôsobmi:

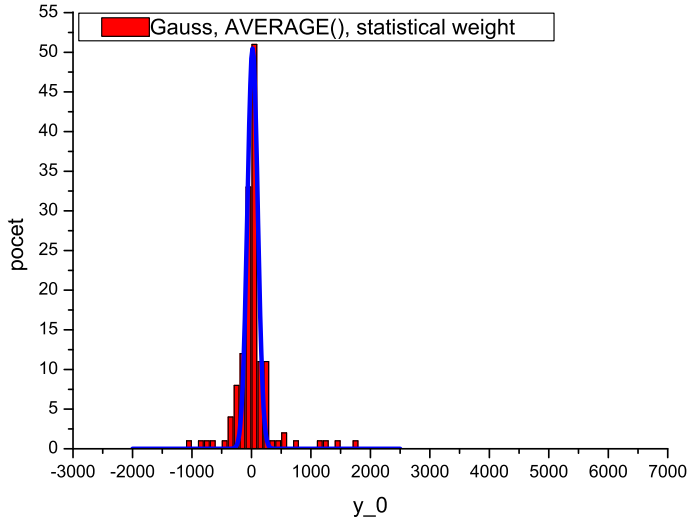
1. Od hodnoty ADU konkrétneho obrazového bodu (pixelu) (x, y) bol odpočítaný medián (x, y) z prvých 7 snímiek (viď kapitolu o redukcii). Medián je štandardným výstupom programu RESPEC. Výsledok môžte vidieť na grafe 39.
2. Namiesto mediánu bol použitý aritmetický priemer $\langle h \rangle = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{7} h_i$, počítaný z prvých 7 snímok. Výsledok možno vidieť na grafe 40.
3. Bol použitý aritmetický priemer z bodu 2. Naviac bola použitá váha kvadratickej odchylky $w_e(x) = f(x)/\max f(x)$. Táto váha má tú výhodu, že preferuje hodnoty s vysokým ADU a znižuje vplyv šumu pozadia. Pozadie potom neovplyvňuje výslednú funkciu toľko, ako pri váhe $w_e(x) = 1$. Výsledok viď graf 41.



Graf 39 – *Histogram rozloženia hodnôt y_0 fitu datasetom spektier funkciou (13) pri použitom mediáne.*



Graf 40 – *Histogram rozloženia hodnôt y_0 fitu datasetom spektier funkciou (13) pri použitom aritmetickom priemere.*



Graf 41 – *Histogram rozloženia hodnôt y_0 fitu datasetom spektier funkciou (13) pri použitom aritmetickom priemere s váhou $w_e(x) = f(x)/\max f(x)$. Všetky tri grafy majú pre lepšie porovnanie rovnaký rozsah hodnôt x rovnaký.*

Hodnoty y_0 sú v grafe 39 nesymetricky rozložené voči bodu 0. Základná štatistika dáva pre strednú hodnotu $\bar{y_0} = 2400 \pm 300$ s rozptylom 3500 (medián 1700). Sofistikovanejšia štatistika (predpoklad normálneho rozdelenia y_0, fit Gaussovou funkciou) neprikladá takú veľkú váhu extrémom a pre jej parametre vychádza $x_c = 1450 \pm 70; w_c = 1650 \pm 70$. Predpoklad, že pri mediáne je stredná hodnota $y_0 = 0$ teda neplatí. Ukážme si, prečo.

Porovnanie mediánu a aritmetického priemeru

Výstup z RESPEC-u popisuje pozadie pomocou mediánu prvých siedmich snímiek. Tento popis má tú výhodu, že uletené hodnoty (outliers) neovplyvnia výsledok. Pri predpokladanom Poissonovom rozdelení platí medzi mediánom a strednou hodnotou vzťah

$$\mathrm{mean}(x) = \overline{x} = \lambda\,. \tag{14}$$

$$\mathrm{median}(x) = \tilde{x} \approx \left\lfloor \lambda + \frac{1}{3} - \frac{0{,}02}{\lambda} \right\rfloor\,. \tag{15}$$

Zdroj (URL [2]). Značky $\lfloor x \rfloor$ označujú spodnú celú časť čísla x. Ak je λ veľké, potom je reciproký člen (15) zanedbateľný voči lineárnemu.

Praktické merania ukázali, že stredná hodnota pozadia poľa kamery je približne 25 ADU, môžeme teda zanedbať reciproký člen. Zaveďme pre jednoduchosť pomer $\xi = \overline{x}/\tilde{x}$. Z rovníc (14) a (15) dostaneme po zanedbaní kvadratického členu v $\tilde{x}$

$$\xi \approx \frac{\lambda}{\left\lfloor \lambda + \frac{1}{3} \right\rfloor}\,.$$

Predpokladajme, že $x \gg 1$ má Poissonovo rozdelenie a pohybujeme sa v oblasti, kde možno rozdelenie považovať za rovnomerné. Pre $\overline{x}$ potom platí $\overline{x - 1/2} = \overline{\lfloor x \rfloor}$. Na základe toho

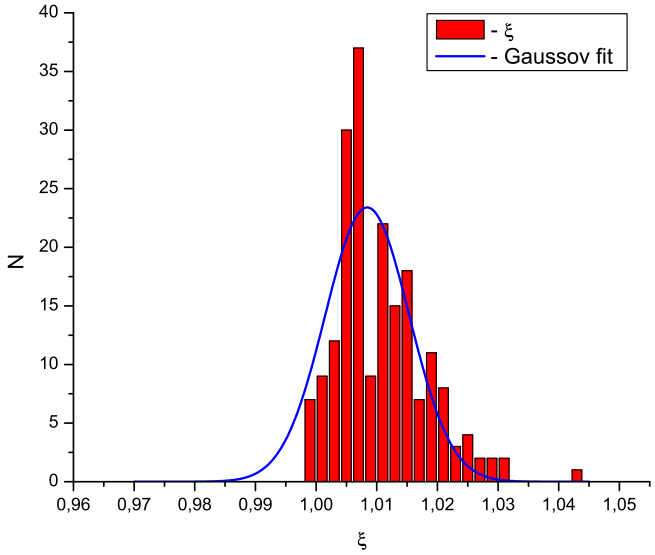
$$\overline{\left\lfloor \lambda + \frac{1}{3} \right\rfloor} = \overline{\left(\lambda + \frac{1}{3}\right) - \frac{1}{2}} = \overline{\lambda - \frac{1}{6}} = \overline{\lambda} - \frac{1}{6}\,. \tag{16}$$

Zanedbajme ďalej koreláciu medzi podielom $\overline{x}$ a $\tilde{x}$ (hodnoty $\tilde{x}$ a $1/\overline{x}$ nie sú zviazané, ich podiel nebude korelovať). Potom možno pre strednú hodnotu $\overline{\xi}$ písať

$$\overline{\xi} = \frac{\overline{\lambda}}{\overline{\left\lfloor \lambda + \frac{1}{3} \right\rfloor}} = \frac{\overline{\lambda}}{\overline{\lambda} - \frac{1}{6}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{6\overline{\lambda}}}\,; \qquad \overline{\xi}(25) = 1{,}0067\,. \tag{17}$$

Tento výsledok je v dobrej zhode s numerickou intergráciou, ktorá dáva pre $\overline{\xi}_{\mathrm{num.}}(25) = 1{,}0068$.

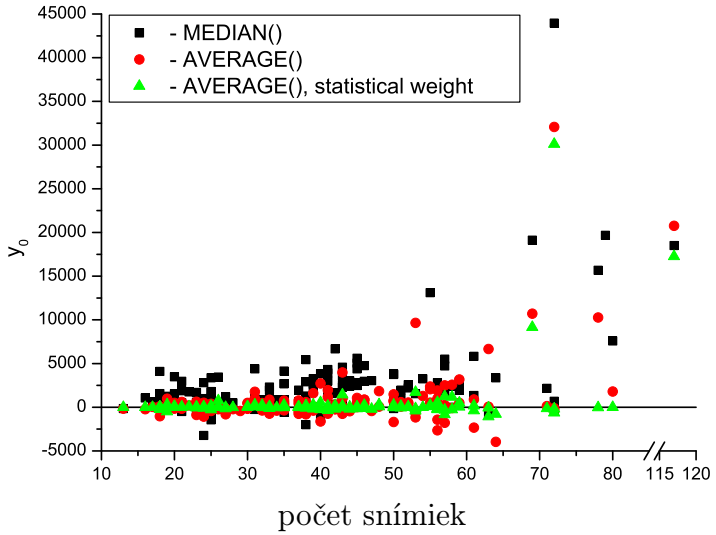
Graf 42 ukazuje histogram ξ pre všetky merané spektrá. Ako medián, tak stredná hodnota (v našom prípade aritmetický priemer) bola počítaná z prvých siedmych snímiek. Pre strednú hodnotu dostávame $\overline{\xi}_{\mathrm{obs.}} = 1{,}0106 \pm 0{,}0005$. Vychádza teda vyššia hodnota, ako sa čakalo. V grafe je pre orientáciu nanesená aj symetrická funkcia. Rozdelenie experimentálnych hodnôt nie je symetrické. Existuje proces, ktorý zvyšuje ADU niektorých obrazových bodov. Jedným z dôvodov môže byť vyšší počet vysokých hodnôt ADU pozadia ako sa čakalo.



Graf 42 – *Histogram rozdelenia ξ z rovnice (17). Pre porovnanie je zobrazená symetrická Gaussova funkcia – asymetria rozdelenia ξ je zreteľne vidieť. Distribučná funkcia uvedeného rozdelenia sa veľmi dobre zhoduje s Boltzmannovým rozdelením – koeficient determinácie je $R^2 = 0{,}9968$. Dôvod tak vysokej vierohodnosti je neznámy.*

Niektoré meteory začínajú skôr ako na ôsmej snímke a ovplyvňujú tak proces redukcie. Predpokladá sa, že existujú aj ďalšie dôvody.

Na základe uvedeného záveru bol zmenený pracovný algoritmus. Ďalej sa nepoužíva predvolený medián v ALS súbore, ale počíta sa so strednou hodnotou – s aritmetickým priemerom. Určí sa metóda, pomocou ktorej sa bude voliť vhodná hodnota y_0.



Graf 43 – *Závislosť y_0 na počtu snímok pre tri rôzne spôsoby fitu. Popis jednotlivých spôsobov je na strane 58.*

V grafe 43 sú nanesené všetky y_0 troch rôznych fitov (13).

- *Median* značí použitie mediánu pri redukcii snímku.

- *Average* značí použitie aritmetického priemeru pri redukcii snímku.
- *Average statistical* značí použitie aritmetického priemeru pri redukcii snímku s váhou $w = f(x)/\max f(x)$.

Z grafu 43 je vidieť, že od istej hranice počtu snímiek y_0 niektorých fitov prudko rastie. Čím je meteor jasnejší, tým väčší počet snímiek obsahuje záznam. Zároveň vieme, že jasné meteory po sebe zanechávajú jasné a dlhotrvajúce stopy. Vysoké hodnoty y_0 sú spôsobené stopou meteoru, aj keď nie priamo zelenou čiarou. Je ale vždy nutné preskúmať, či za zvýšenie intenzity môže zelená čiara (u veľmi jasných meteorov s malým sklonom dráhy letu je zelená čiara dlhšia ako priemer zorného poľa) alebo čiara iná. Tento efekt je redukovaný tým, že integrálna intenzita zelenej čiary sa počíta až od druhej snímky po prelete meteoru v danej výške.

U niektorých spektier dosiahne y_0 vo fite vysoké hodnoty, ktoré sú prakticky totožné s konštantným fitom v tých výškach, ktoré nie sú ovplyvnené žiarením meteoru. Rozdiely sú podstatne menšie ako chyba fitu aj rozptyl strednej hodnoty. Nepredpokladáme, že by meteor žiaril (a k tomu približne konštantne) vo výškach na 120 km. V týchto prípadoch je dobré určiť y_0 z oblasti, kam nezasahuje žiarenie meteoru.

Zavedenie $y_0 = 0$ má výhodu ešte v tom, že pri hľadaní najlepšieho fitu sa v x_c a w_c posúvame oveľa menej ako s voľným y_0. Stáva sa potom menej často, že fit uviazne v nefyzikálnom lokálnom minime, do ktorého dospel vďaka driftu v y_0.

6.4 Program vyska_intenzity

Za účelom analýzy ALS súborov bol vytvorený program `vyska_intenzity`. Jeho výstupom je niekoľko rôznych textových súborov vo formáte CSV. Pre ďalšiu analýzu je najpodstatnejší INT – súbor, ktorý obsahuje integrálne intenzity zelenej čiary v časových rezoch so zvoleným krokom – najčastejšie 0,5 km, v niektorých prípadoch 0,1 km. Každý riadok obsahuje dvojicu výška–integrálna intenzita zelenej čiary.

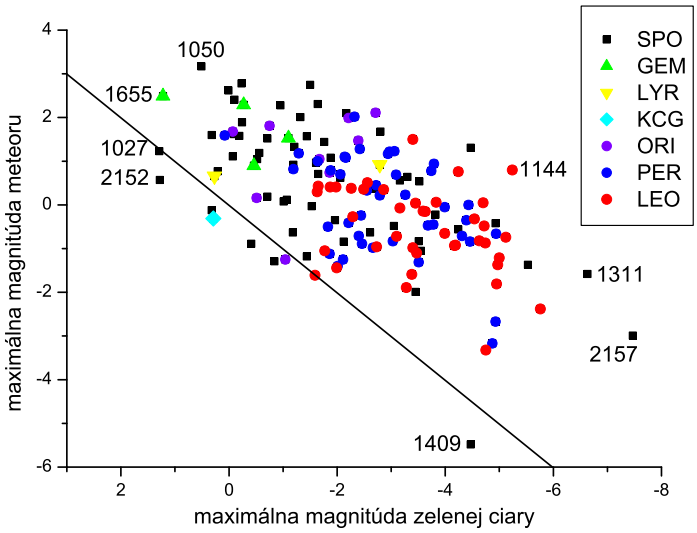
Po predchádzajúcej analýze a odstránení nevhodných spektier boli výsledné súčty sumované cez všetky snímky. Snímky boli prečíslované tak, aby snímka s poradovým číslom 0 bola pre danú výšku snímkou, na ktorej je meteor. Znamená to, že pre rôzne výšky máme rôzne číslovanie snímiek v rovnakom čase. Pre nás je dôležitý iba lokálny vývoj zelenej čiary, tento postup je preto plne funkčný. Pri analýze je možné okrem snímku 0 odstrániť ešte snímok 1. Pri ladení sa ukázalo, že v niektorých prípadoch nie je presnosť určenia polohy čela meteoru dostatočná. Podľa redukcie programom RESPEC je poloha skutočného čela meteoru niekedy príliš ďaleko od predpokladanej polohy. Časť kontinua meteoru sa premietne na snímku 1. Je treba zvoliť kompromis. Buď na snímke 1 ponechať časť kontinua meteoru, alebo odstrániť časť žiarenia zelenej čiary. Pretože zväčša je kontinuum meteoru silnejšie ako začiatok žiarenia meteoru, bolo uprednostnené snímku 1 odstrániť. V nastavení programu sa dá toto implicitné správanie zmeniť.

U časových rezov bola snímka 1 ponechaná, v tomto prípade došlo k inému kompromisu. Snímka s nízkym číslom má podstatne väčšiu výpovednú hodnotu

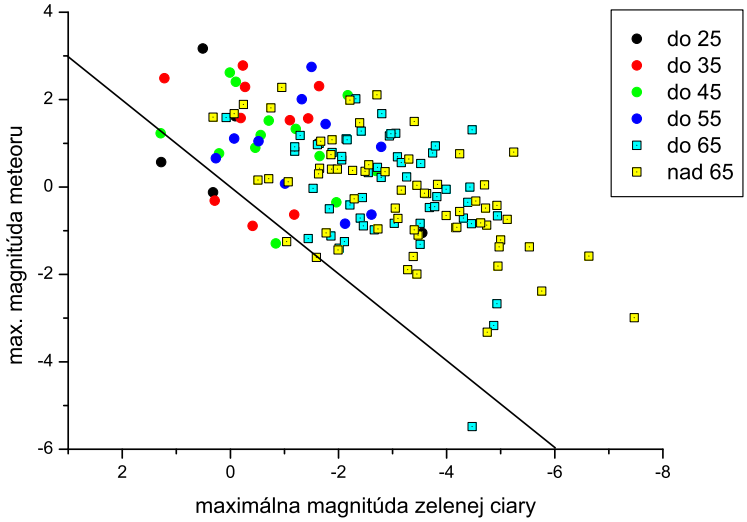
o tvare časovej závislosti žiarenia zelenej čiary, ako snímka s číslom vyšším. V kapitole o časových rezoch bude ukázané, ako veľmi záleží na prvých snímkach pri hľadaní tvaru intenzity zelenej čiary v závislosti na čase.

6.5 Výsledky analýzy integrálnej intenzity

Nasleduje niekoľko grafov, ukazujúcich vzájomné funkčné závislosti premenných. Hodnoty $A, x_c = h_c$ a w_c sú identické ako v rovnici (13). Vyčnievajúce hodnoty budeme v grafoch značiť číslom spektra bez prefixu SZ.



Graf 44 – *Závislosť maximálnej intenzity zelenej čiary na maximálnej intenzite meteoru.*



Graf 45 – *Porovnanie maximálnej magnitúdy zelenej čiary a maximálnej magnitúdy meteoru v závislosti na rýchlosti. Z grafu vidieť, že existujú aj meteory s nízkou geocetrickou rýchlosťou produkujúce zreteľnú zelenú čiaru.*

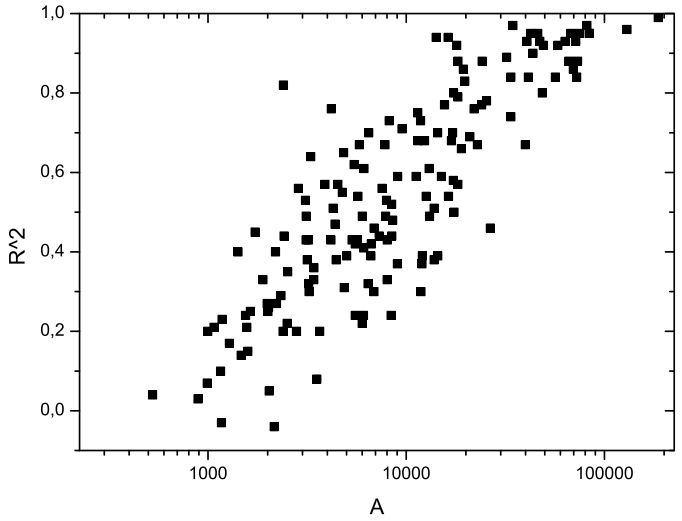
Závislosť maximálnej magnitúdy zelenej čiary na maximálnej magnitúde meteoru je v grafe 44. Meteory jednotlivých rojov sú farebne označené: GEM – Geminidy, LYR – Lyridy, KCG – κ Cygnidy, ORI – Orionidy, PER – Perzeidy, LEO –

Leonidy, SPO – sporadické meteory a nerozlíšené roje. Parametre meteorických rojov viď tabuľky 3a a 3b v (Jenniskens, 1994). Maximálna magnitúda meteoru bola braná z MIM súboru. Je treba zdôrazniť, že obe intenzity nastávajú v rôznych výškach. Šikmou čiarou je naznačená priama úmera $y = x$.

Všimnite si, kde sa nachádzajú rýchle Leonidy a kde pomalé Geminidy. Leonidy majú pre danú maximálnu jasnosť nadpriemerne jasnú zelenú čiaru. Je to spôsobené tým, že Leonidy sú tvorené krehkým materiálom s vysokým K_B (a taktiež majú vyššiu rýchlosť). Tiež neexistuje jediná Leonida s maximálnou jasnosťou meteoru väčšou ako 1,5 magnitúdy. Bolo by rozumné očakávať, že slabé Leonidy budú mať zastúpenie medzi ostatnými slabými meteormi, ale nie je to tak. Ako Orionidy, tak Perzeidy majú pomerne dosť zástupcov medzi slabšími meteormi. Nemožno preto argument, že je to spôsobené veľkou uhlovou rýchlosťou meteoru. Príčina môže spočívať v mladom materiále materskej kométy 55P/Tempel–Tuttle, ktorý je mimoriadne krehký a má vysoké K_B. Pri porovnaní meteorov s rýchlosťou nad 65 kilometrov vidíme, že sa medzi nimi vyskytujú aj meteory s jasnosťou nad 2 magnitúdy (viď graf 45).

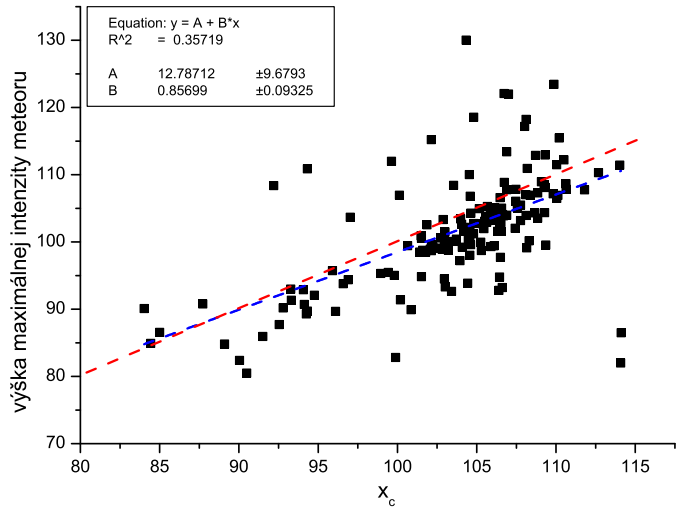
Za účelom skúmania zelenej čiaru v závislosti na rýchlosti je vhodné robiť kampane na mladé kometárne roje s malou geocentrickou rýchlosťou.

Grafy 46 a 47 ukazujú závislosti výšky maxima jasnosti zelenej čiary na výške maxima jasnosti meteoru. V grafe 46 je červenou čiarou naznačená priamka $y = x$, modrou nejlepší lineárny fit. V grafe 47 je červenou čiarou naznačená priamka $y = x$, modrou nejlepší lineárny fit s podmienkou, že sklon je rovný 1. Z grafu 47 vyplýva, že zelená čiara má maximum v priemere o 2 kilometre vyššie, ako samotný meteor. Po odstránení veľmi krehkých meteorov, ktoré svietia vo veľmi vysokých výškach, je posun 4 kilometre.

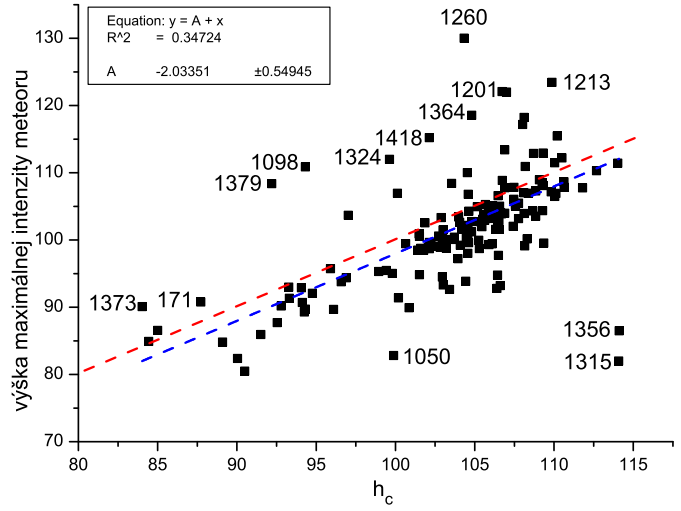


Graf 48 – *Závislosť amplitúdy na koeficiente determinácie.*

Na grafe 48 vidieť, že čím väčšia amplitúda zelenej čiary, tým lepší koeficient determinácie. Až na niektoré výnimky (napr. SZ1373, viď graf 38) je Gaus-



Graf 46 – *Graf závislosti výšky maxima zelenej čiary na výške maxima jasnosti meteoru. Červenou čiarou je naznačená priamka $y = x$, modrou nejlepší lineárny fit.*

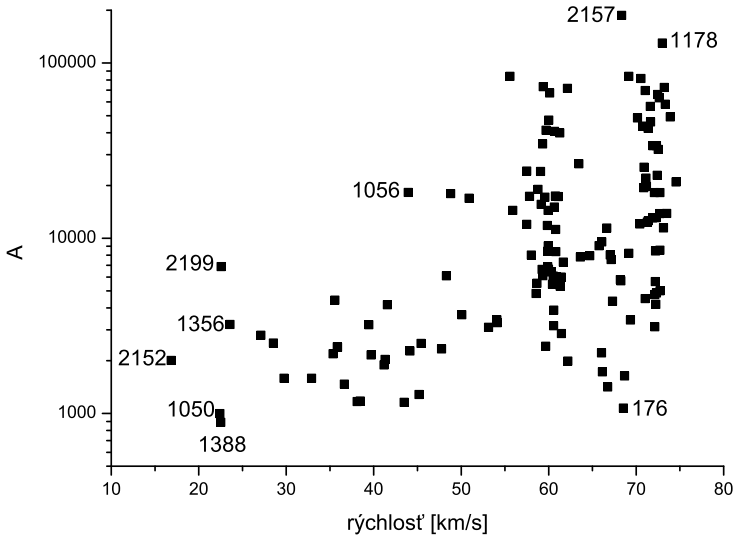


Graf 47 – *Graf závislosti výšky maxima zelenej čiary na výške maxima jasnosti meteoru. Červenou čiarou je naznačená priamka $y = x$, modrou nejlepší lineárny fit získaný metódou najmenších štvorcov s podmienkou, že sklon je rovný 1.*

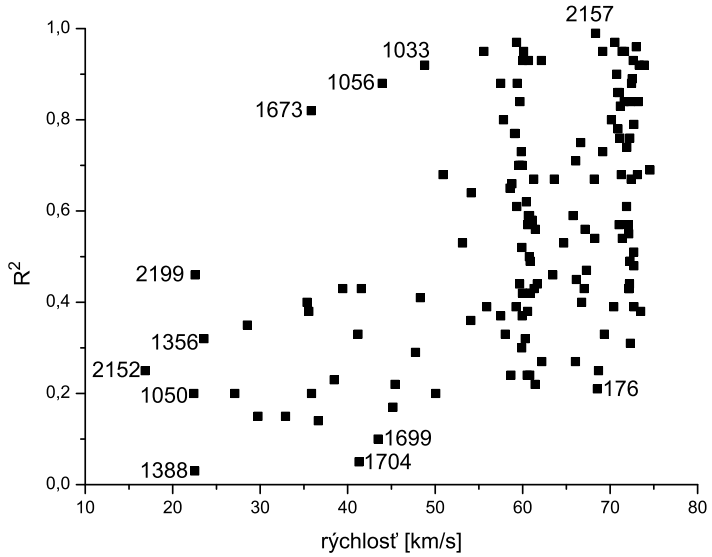
sova funkcie (13) vhodnou funkciou popisujúcou integrálnu intenzitu zelenej čiary. Nízka hodnota determinácie nie je spôsobená nevhodným fitom, ale nízkym pomerom signál/šum amplitúdy zelenej čiary a šumu pozadia.

Grafy 49 a 50 ukazujú závislosť rýchlosti na A a R^2. Existuje medzi nimi vysoká korelácia, najmä pri malých rýchlostiach. Pokles R^2 s klesajúcou rýchlosťou súvisí s poklesom amplitúdy A, viď graf 48.

Graf 51 ukazuje závislosť položírky Gaussovej funkcie w_c na amplitúde A. Ak urobíme fit metódou najmenších štvorcov, tak sklon $\frac{\ln A}{w_c} = 0{,}18 \pm 0{,}07$. Ak odstránime vyčnievajúce body vpravo (veľké w_c a malé A) a urobíme fit nie metódou najmenších štvorcov, ale geometrický odhad, vychádza sklon blízky 1.



Graf 49 – *Závislosť amplitúdy zelenej čiary na rýchlosti. Všimnite si rozptyl amplitúdy, ktorý majú Leonidy a Perzeidy (dva zhluky bodov s rýchlosťami približne 60 a 70* km/s*).*

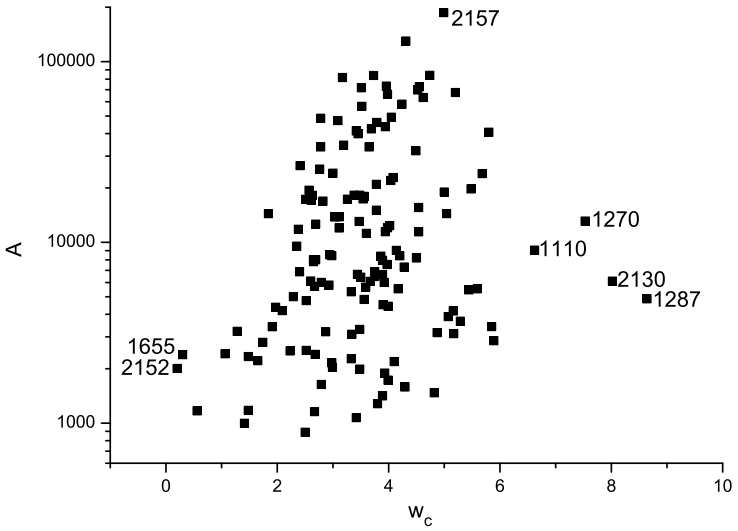


Graf 50 – Závislosť rýchlosti meteoru na R^2.

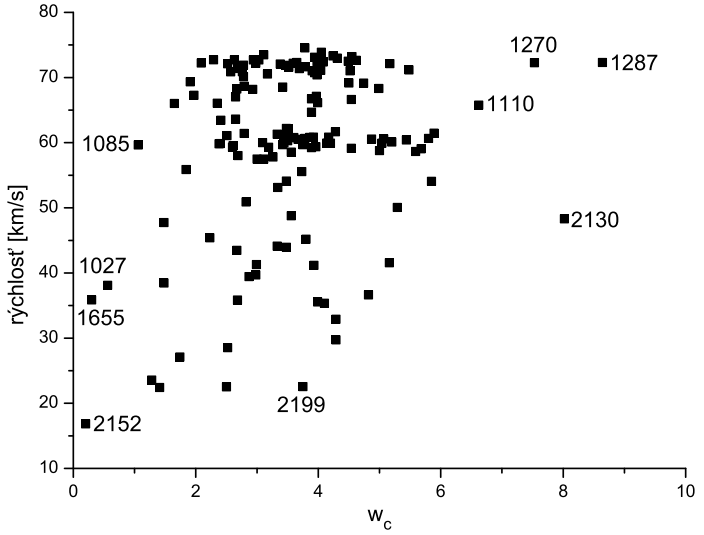
Zo zväčšujúcou sa amplitúdou teda stúpa aj položírka. Ak urobíme fit metódou geometrických priemerov, vychádza sklon pre $\frac{\ln A}{w_c} = 1{,}13 \pm 0{,}61$.

Z vyčnievajúcich bodov vľavo sú spektrá SZ1270 a SZ1287 v šume, ktorý môže w_c rozširovať. Zo spektra 2130 máme iba časť po maximum. Spektrum SZ1110 je ale pekné a reálne. Ich spoločnou charakteristikou je, že patria medzi čiary s najvyššou výškou $x_c = h_c$. Ak vezmeme do úvahy, že aj v grafe 55 sú tieto body na okraji, jedná sa zrejme o dobre fitované data, o reálne zelené čiary.

Graf 52 je graf závislosti w_c na rýchlosti. Podľa predpokladu nie je rýchlosť závislá na položírke w_c. To podporuje názor, že meteor má pri vzniku zelenej čiary jediný význam – dodať do systému energiu. Napriek tomu, že K_B závisí na rýchlosti, v tomto grafe sa to neprejavuje. Body vľavo s $w_c \to 0$ majú veľmi malú



Graf 51 – *Závislosť položírky w_c na amplitúde A.*



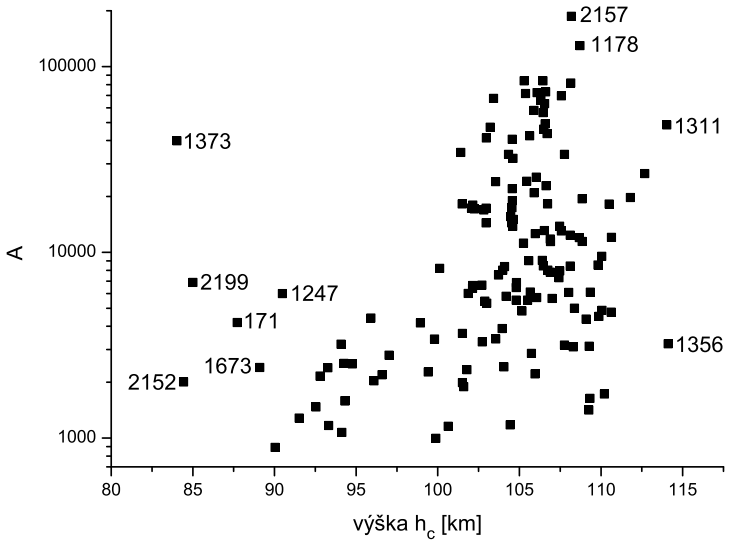
Graf 52 – Závislosť položírky w_c na rýchlosti v.

amplitúdu (a tiež malú rýchlosť) a je možné, že niektoré z nich nepatria zelenej čiare, ale náhodnému zjasneniu pozadia.

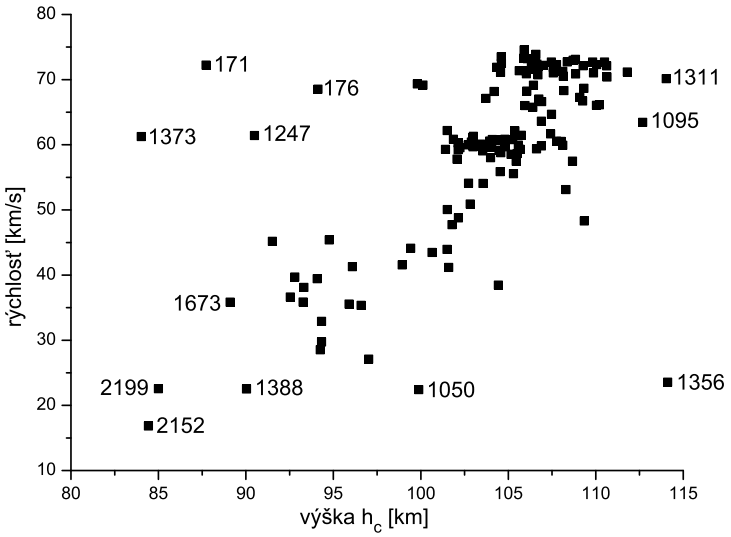
Na grafoch 53, 54 a 55 možno vidieť závislosť h_c na troch parametroch: A, w_c a rýchlosti.

Graf 53 ukazuje závislosť amplitúdy na výške maxima zelenej čiary. Je vidieť, že v nižších výškach je čiara podstatne slabšia. Výnimkou je niekoľko bodov s nízkym h_c. V tomto prípade sa ale zrejme u niektorých jedná o mierne odlišný proces. Dôkazom môže byť spektrum Perzeidy s dvoma maximami zelenej čiary, ktoré sa podarilo pozorovať, viď kapitola 8.

Graf 54 ukazuje závislosť maxima intenzity zelenej čiary na rýchlosti. Body vľavo hore sú reálne. Patria napr. spektrám SZ171 (Orionida, význačné spektrum, druhé najvyššie $K_B = 8{,}15$ v datasete), alebo SZ1373 (Perzeida zakončená výbuchom vo výške zhruba 80 kilometrov – vďaka tomu vznikol výrazne nesymetrický profil zelenej čiary vo veľmi nízkej výške, viď graf 38).



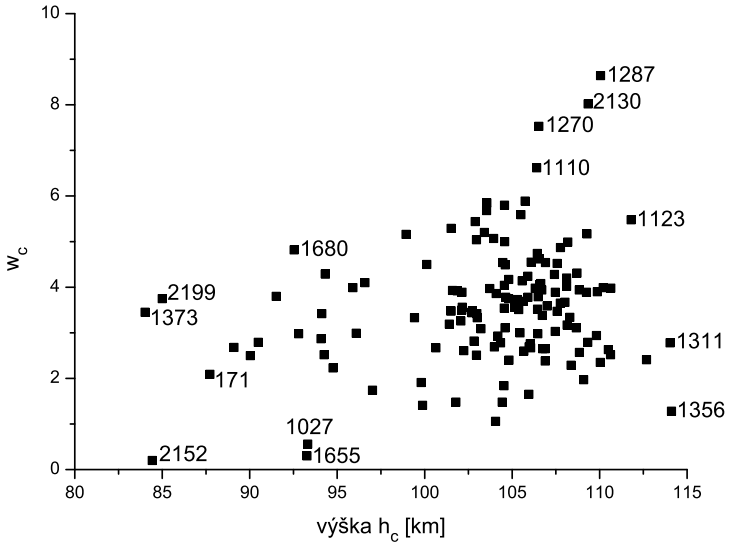
Graf 53 – *Závislosť amplitúdy A na výške maxima zelenej čiary.*



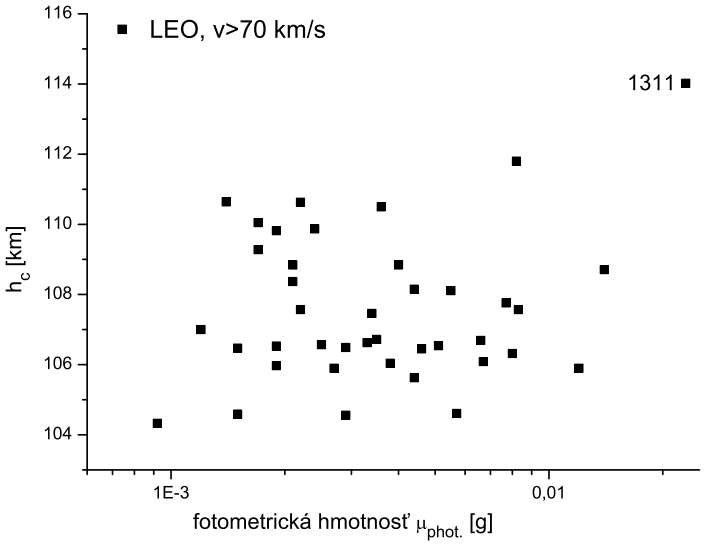
Graf 54 – *Závislosť maxima intenzity zelenej čiary na rýchlosti.*

Naproti tomu bod vpravo dole (výška nad 114 km) nie reálne. Patria spektru SZ1356. Fit je horší: a $R^2 = 0{,}31$, a meteor začína žiariť podstatne nižšie ako je umiestnená zelená čiara. Pološírka w_c je malá. Je isté, že v grafe bol k zelenej čiare priradený jav, ktorá je v skutočnosti iného pôvodu. Pík je výrazný, došlo zrejme k prechodu cirru zorným poľom alebo k podobnému procesu, ktorý zmenil intenzitu pozadia záznamu. Ak by sme sa chceli vyhnúť takejto chybe zvýšením R^2, tak by sme museli minimálne 40 zo 158 fitov vylúčiť (40 meteorov má $R^2 < 0{,}31$). To je 25 % všetkých fitov. Takúto stratu si nemôžeme dovoliť, je lepšie v datasete nechať niekoľko falošných stôp.

Grafy 56 a 57 ukazujú závislosť parametrov zelenej čiary na fotometrickej hmotnosti. Zatiaľčo maximum h_c na $\mu_{\text{phot.}}$ nezávisí, amplitúda A ano. Spektrum SZ1311 je vynímočné tým, že sklon dráhy meteoru v zemskej atmosfére bol mimoriadne veľký – výška radiantu nad obzorom bola iba 5 stupňov. Rovnako rastie aj pološírka w_c (graf 58).



Graf 55 – *Z grafu je zrejmé, že w_c prakticky nezávisí na polohe maxima zelenej čiary. Vynímkou je niekoľko meteorov s veľmi vysokým maximom zelenej čiary – tieto sa pravdepodobne skladajú z krehkého, mladého kometárneho materiálu.*



Graf 56 – *Závislosť amplitúdy A na fotometrickej hmotnosti $\mu_{\mathrm{phot.}}$.*

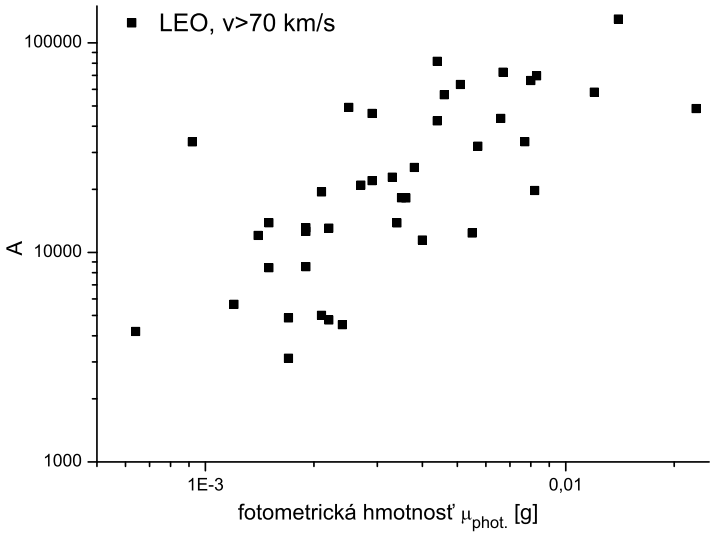
Koeficient K_B

Koeficient K_B zaviedol Ceplecha v (Ceplecha, 1988):

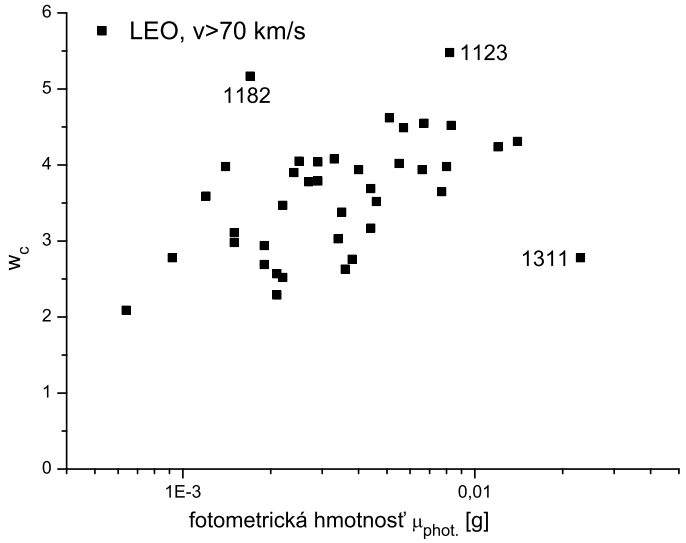
$$K_B = \log \rho_B + 2{,}5 \log v_\infty - 0{,}5 \log \cos z_R \,, \tag{18}$$

kde ρ_B je hustota vzduchu na počiatku svetelnej dráhy (v g/cm^3), v_∞ počiatočná rýchlosť (v cm/s) a z_R zenitová vzdialenosť radiantu. Použitím tohto kritéria môžeme rozdeliť do nasledujúcich skupín:

- *asteroidálne meteory*: $8{,}00 \leq K_B$
- *typ A*: $7{,}30 \leq K_B < 8{,}00$
- *typ B*: $7{,}10 \leq K_B < 7{,}30$ a $q \leq 0{,}30\,\mathrm{AU}$
- *typ C*: $6{,}60 \leq K_B < 7{,}10$
- *typ D*: $K_B < 6{,}60$



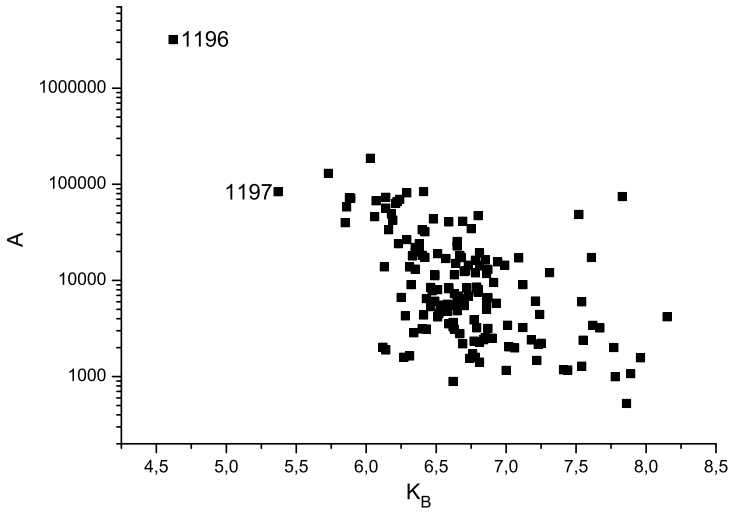
Graf 57 – *Závislosť výšky maxima zelenej čiary h_c na fotometrickej hmotnosti* $\mu_{\mathrm{phot.}}$.



Graf 58 – *Závislosť výšky maxima zelenej čiary h_c na fotometrickej hmotnosti* $\mu_{\mathrm{phot.}}$.

Pozrime sa teraz na grafy závislostí K_B na ďalších parametroch. V grafe 59 vidieť, že hodnota $K_B - 2{,}5 \log v_\infty$ koreluje s amplitúdou. Čím je hodnota parametru A nižšia, tým je pravdepodobnejšie, že meteor je kompaktnejšieho zloženia a začne žiariť v hustejších častiach atmosféry. Krehké častice majú vyššie A. Znamená to, že čím krehkejší materiál, tým väčšiu amplitúdu dosahuje zelená čiara.

Graf 59 ukazuje závislos K_B na amplitúde Zaujímavé je, že dva meteory s najmenšou hodnotou K_B sú po sebe idúce spektrá spektrá SZ1196 a SZ1197. Extrémny bod vľavo má mať amplitúdu približne 3 000 000. Nedá sa zistiť fitom priamo, pretože je k dispozícii len časť spektra do výšky 113 kilometrov, a dovtedy zelená čiara strmo stúpala. Pri predpoklade výšky maximálnej intenzity 107 km (stredná výška maxima najjasnejších zelených čiar, viď graf 53) vychádza $A = 3\,200\,000$.



Graf 59 – *Závislosť K_B na amplitúde Gaussovej krivky.*

Meteor SZ1196 mal absolútnu jasnosť v mieste najväčšej intenzity (115 km) −2,1 magnitúd. Zápornú magnitúdu mal od výšky 130 kilometrov. Zelená čiara u meteoru SZ1196 začala žiariť približne v okamihu 122–123 kilometrov, vtedy rozoznávame začiatok čiary zo šumu. Toto je pravdepodobne horná hranica začiatku zelenej čiary ľubovoľného meteoru, keď koncentrácia atomárneho kyslíka O I stúpa nad $10^{11}/\mathrm{cm}^3$.

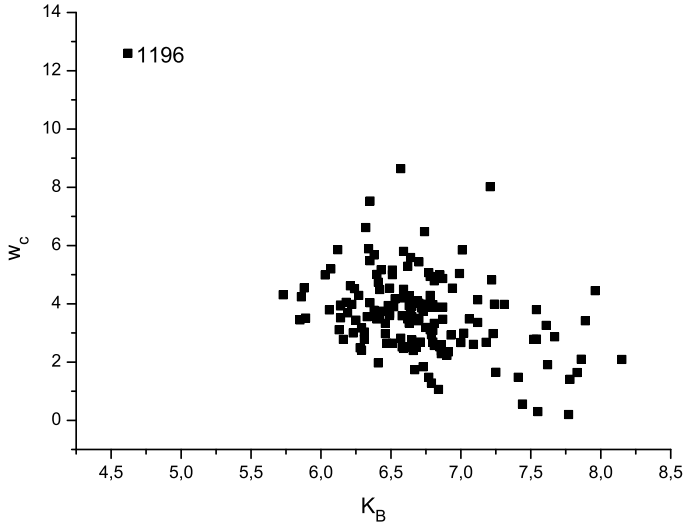
Položírka w_c je len odhadnutá z nábežnej hrany intenzity. Sklon dráhy v zemskej atmosfére nie je malý (42°), nie je preto možné pripisovať veľkú položírku w_c malému sklonu vstupu do atmosféry.

Pri popise K_B na w_c (graf 61) je z rozptylu jednotlivých bodov zrejmé, že popis je len informatívny – s klesajúcim K_B rastie položírka w_c. To znamená, že dráha v atmosfére je dlhšia ako u kompaktnejších meteoroidov. Tento záver je v súlade s prácou (Štork, 2002): čím krehkejší meteoroid, tým skôr začne žiariť, ale aj koncová výška klesá.

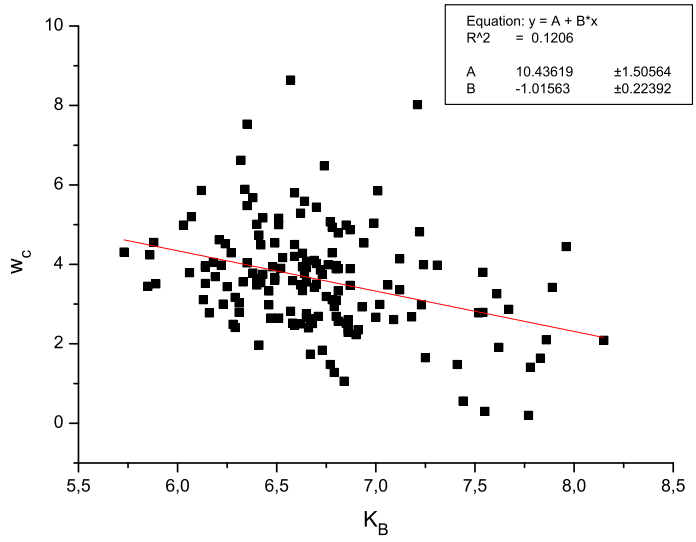
Graf 62 je graf absolútnej magnitúdy (integrálnej) zelenej čiary vs. parameter K_B. Vidíme, že čím krehkejší meteoroid, tým viacej energie vyžiari v zelenej čiare. To by mohlo súvisieť s „dustball“ modelom (Hawkes, 1975) a potvrdzovať ho. Uvedený graf naznačuje, že pri dustballe rozpadnuté zrnká pevnejšieho materiálu ionizujú väčší objem okolitého vzduchu ako jedno monolitické zrnko rovnakej veľkosti.

Bod úplne vľavo je SZ1196. Je braná do úvahy len tá časť čiary, ktorá je skutočne zaznamenaná. Preto je na grafe vyššie, ako v prípade ak by sme zaznamenali celú čiaru. V tom prípade by bola posunutá smerom nadol.

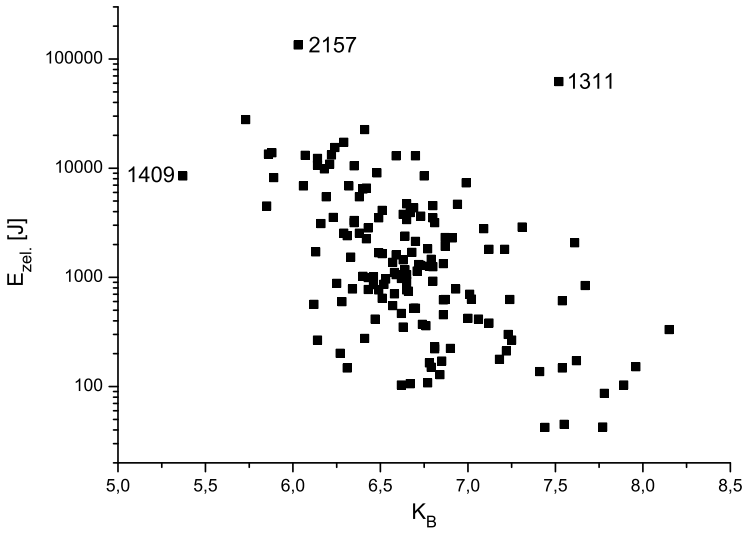
Závislosť parametrov zelenej čiary na zenitovej vzdialenosti radiantu z možno sledovať na grafoch 63–65. Ani jeden z parametrov nezávisí na zenitovej vzdialenosti radiantu, na sklone dráhy meteoroidu v atmosfére.



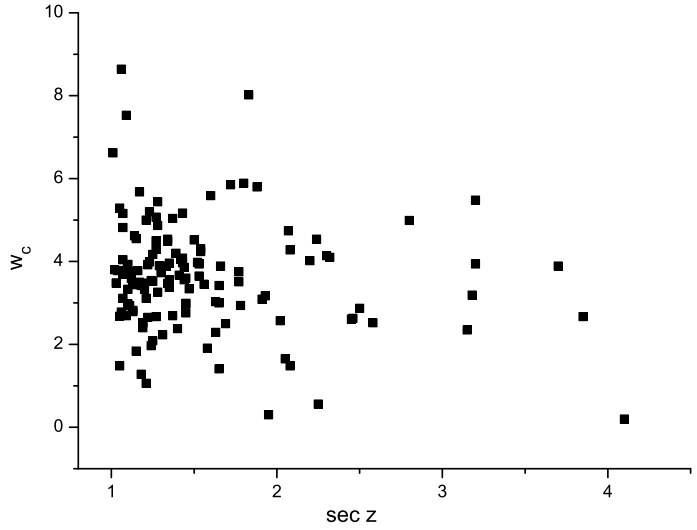
Graf 60 – *Závislosť K_B na položírke Gaussovej krivky. Extrémny meteor č. 1196 je vidieť v tomto prípade vľavo hore.*



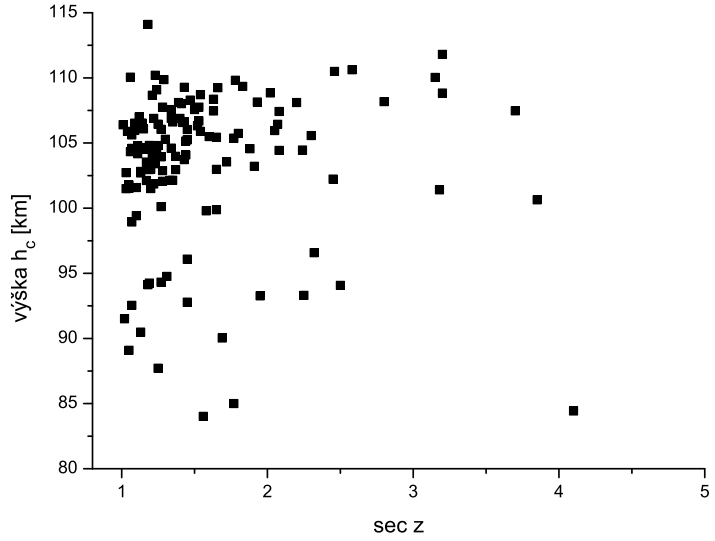
Graf 61 – *Závislosť K_B na w_c popíšme lineárnou funkciou.*



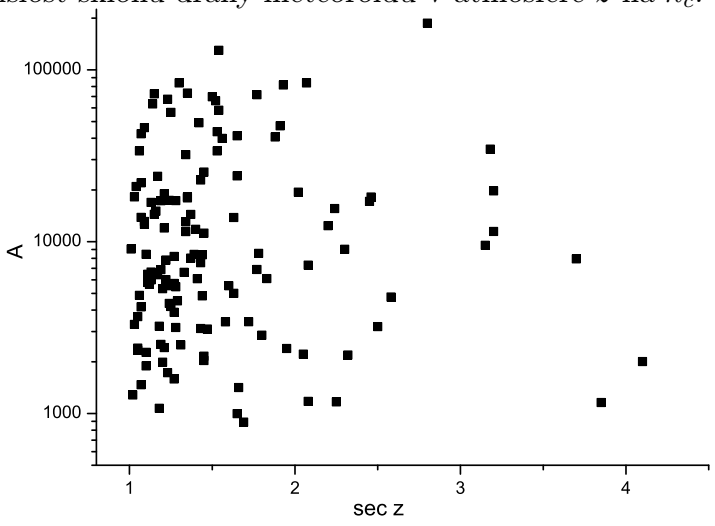
Graf 62 – *Energia vyžiarená v zelenej čiare vs. parameter K_B. Čím krehkejší meteor, tým viacej energie vyžiari v zelenej čiare.*



Graf 63 – *Závislosť sklonu dráhy meteoroidu v atmosfére z na položírke* w_c.



Graf 64 – *Závislosť sklonu dráhy meteoroidu v atmosfére z na* h_c.



Graf 65 – *Závislosť sklonu dráhy meteoroidu v atmosfére z na amplitúde A.*

7 Energia uvoľnená v zelenej čiare

7.1 Pogsonova rovnica pre zelenú čiaru

Pogsonova rovnica, veľmi často používaná v astronómii má tvar

$$\Delta m = -2{,}5 \log \frac{I_1}{I_2} \,. \tag{19}$$

Vychádzajme z pôvodného tvaru, ako ju popisuje Weber-Fechnerov zákon (Hart, 1992)

$$m_r = -2{,}5 \log I \ + C_{\mathrm{r}} \,, \tag{20}$$

kde C_r je „zero point“ magnitúdovej škály. Jeho hodnotu dostaneme zo známych čísiel: podľa (URL [4]) je absolútna vizuálna magnitúda Slnka 4,83 a jeho svietivosť $L_\odot = 3{,}826 \cdot 10^{26}\,\mathrm{W}$. Po dosadení týchto hodnôt dostaneme pre nulový bod $C_r = -18{,}908 \pm 0{,}010$. Nulový bod môžeme spočítať ešte iným spôsobom. Poznáme slnečnú konštantu a poznáme zdanlivú magnitúdu Slnka vo vzdialenosti 1 AU. Po dosadení do rovnice (20) dostaneme

$$C_r = m + 2{,}5 \log I \ = -26{,}74 + 2{,}5 \log 1366 = -18{,}901 \pm 0{,}010 \tag{21}$$

7.2 Výpočet integrálnej magnitúdy a energie uvoľnenej v zelenej čiare

Vieme, že signál 1 ADU zodpovedá magnitúde $m_{\mathrm{phot.}}$. Samotnú zelenú čiaru máme popísanú pomocou Gaussovej funkcie. Čiara dáva signál

$$I(\mathrm{ADU}) = \sqrt{\pi} w_c A \sec z \,,$$

alebo v tvare magnitúdovom

$$M_{\mathrm{zel.}} = m_{\mathrm{phot.}} - 2{,}5 \log(\sqrt{\pi} w_c A \sec z) - a \cdot (\sec h - 1) \,, \tag{22}$$

kde z je dĺžka meteoru na 1 km výšky. $M_{\mathrm{zel.}}$ je *integralna magnitúda meteoru*. Je to ekvivalentná magnitúda, ktorú by mal objekt, ak by všetku svoju svetelnú energiu vyžiaril v intervale jednej snímky. Tretí člen rovnice (22) popisuje atmosférickú extinkciu, pričom a je hodnota extinkcie na jednotku vzdušnej hmoty. Pretože ale magnitúdy referenčných hviezd majú extinkciu podobnú ako samotná zelená čiara, posledný člen vypustíme.

Výpočet celkovej vyžiarenej energie

Z rovnice (20) dostaneme (I' je ekvivalentná intenzita k $M_{\text{zel.}}$)

$$\begin{aligned} \log I' &= \frac{C_r - M_{\text{zel.}}}{2{,}5}\,, \\ I' &= 10^{\frac{C_r - M_{\text{zel.}}}{2{,}5}}\,, \\ I' &= \exp\left(\ln 10 \cdot \frac{C_r - M_{\text{zel.}}}{2{,}5}\right)\,. \end{aligned} \tag{23}$$

Celková vyžiarená energia izotropným svetelným zdrojom je

$$E = I' \cdot S \ \cdot t\,, \tag{24}$$

kde S je plocha, na ktorej k vyžarovaniu dochádza a t čas.

Ako meteor, tak zelená čiara ale trvajú iba obmedzený čas. V rovnici (23) musíme urobiť prepočet $M_{\text{zel.}}$ na 1 sekundu. V rovnici (22) sa vzťahuje $m_{\text{phot.}}$ k jednej snímke, to jest k 1/25 sekundy. To znamená, že intenzita rozprestrená do jednej sekundy bude

$$I' \cdot t = \frac{1}{25} \cdot \exp\left(\ln 10 \cdot \frac{C_r - M_{\text{zel.}}}{2{,}5}\right)\,.$$

Magnitúda $M_{\text{zel.}}$ je prepočítaná na vzdialenosť meteoru 100 kilometrov. Predpokladajme, že stĺpec ionizovaného plynu, ktorý vyžaruje v zelenej čiare, je opticky tenký na vlnovej dĺžke 557,7 nm. Potom nedochádza k absorpcii v stĺpci a celková vyžiarená energia bude

$$E = E_{\text{zel.}} = 4\pi R^2_{100\,\text{km}} \cdot \frac{1}{25} \cdot \exp\left(\ln 10 \cdot \frac{C_r - M_{\text{zel.}}}{2{,}5}\right)\,. \tag{25}$$

Po dosadení numerických čísiel dostanem z (25) rovnicu

$$E = 0{,}503 \cdot 10^{10} \cdot \exp\left(-0{,}9210 \cdot (18{,}901 + M_{\text{zel.}})\right)\,. \tag{26}$$

Toto je tvar vhodný pre výpočet energie zo zelenej čiary v programe.

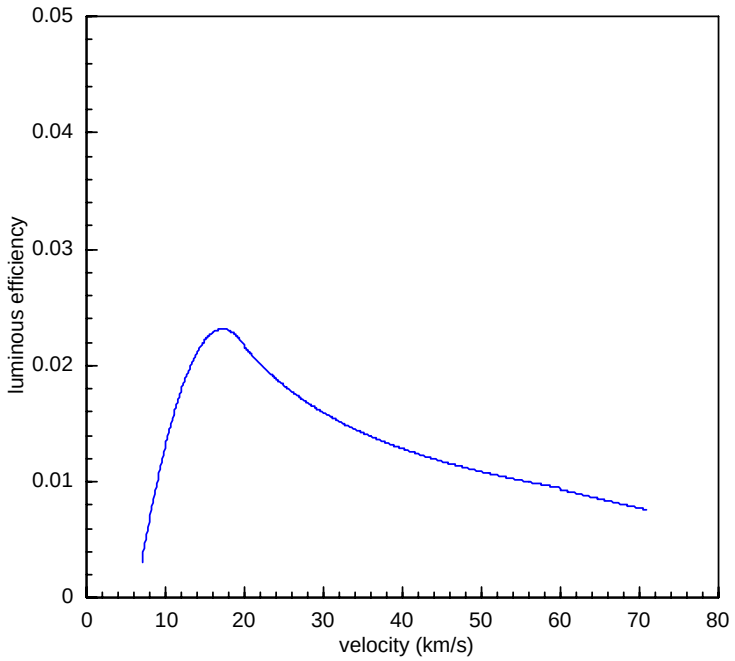
Pre výpočet magnitúdy zelenej čiary použime Pogsonovu rovnicu (19)

$$M_{\text{zel.}} = m_{\text{phot.}} - 2{,}5 \log\left(I(\text{ADU}) \cdot \sec z\ \right)\,. \tag{27}$$

Dosadením rovnice (27) do rovnice (25) dostaneme

$$E = 4\pi R^2_{100\,\text{km}} \cdot 10^{\frac{C_r - m_{\text{phot.}}}{2{,}5}} \cdot \sum(\text{ADU})\,, \tag{28}$$

čo je analytický tvar vhodný pre ďalšiu teoretickú prácu. $\sum(\text{ADU})$ je celkový súčet signálu cez všetky snímky, ktorý je uložený v INT súbore.



Graf 66 – *Svetelná účinnosť, prebraté z práce (Rogers, 2005). Svetelná účinnosť je pomer medzi energiou vyžiarenou vo viditeľnom svetle a celkovou kinetickou energiou meteoru.*

7.3 Účinnosť premeny kinetickej energie meteoru

Zaveďme si účinnosť $\eta_{\text{phot.}}$ premeny kinetickej energie meteoru na svetelnú účinnosť ako pomer celkovej energie vyžiarenej v zelenej čiare a kinetickej energie meteoru.

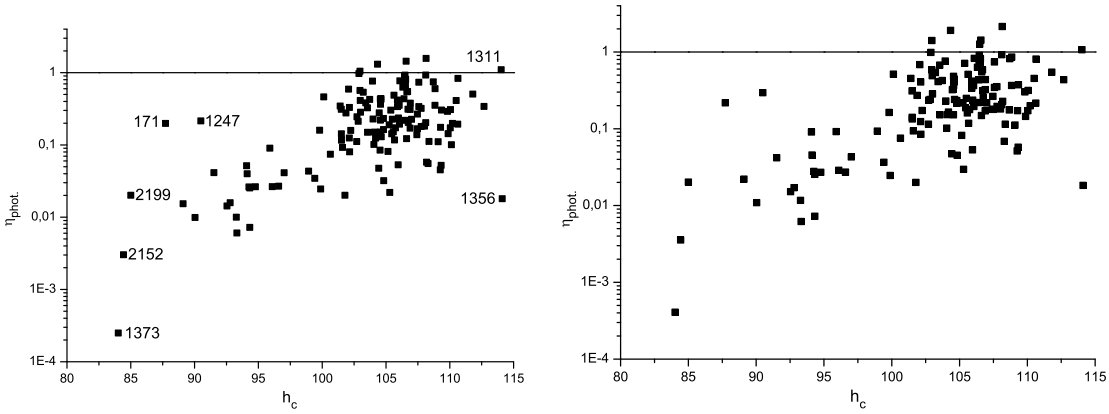
$$\eta_{\text{phot.}} = \frac{E_{\text{zel.}}}{E_{\text{kin.}}}$$

Za hmotnosť meteorického telesa sa berie fotometrická hmotnosť $\mu_{\text{phot.}}$ zo súboru MIM. V ňom sa nachádza niekoľko hodnôt (pre každú stanicu jedna), ktoré sa od seba značne líšia – niekedy aj pomerom $1 : 100$. Je to pravdepodobne táto nepresnosť v určení, ktorá má za následok nepríjemnú skutočnosť: $\eta_{\text{phot.}} > 1$. V nasledujúcich grafoch možno vidieť niekoľko meteorov, ktorých účinnosť premeny kinetickej energie na energiu zelenej čiary zdanlivo porušuje prírodné zákony.

Dôvodov, prečo vychádza $\eta_{\text{phot.}} > 1$ môže byť viacej.

- Chybne určené parametre zelenej čiary: A, w_c, h_c.
- Chybná redukcia nulového bodu v rovnici (21), spôsobená buď chybnými vstupnými hodnotami, alebo chybnou fotometrickou korekciou pri prechode cez dva fotometrické systémy.
- Systematická chyba určenia hodnoty $\mu_{\text{phot.}}$. Môže byť spôsobená napr. chybnými hodnotami svetelnej účinnosti. Hodnoty v prácach (Ceplecha, 1996), (Saidov, 1989) a (Rogers, 2005), ktoré sa snažia o určenie svetelnej účinnosti, sa líšia v ráde.
- Atmosféra sa v danej výške nemusí nachádzať v najnižšom energetickom stave. Meteor spustí v atmosfére proces, ktorý z nej vytiahne uloženú energiu a prevedie ju bližšie k najnižšiemu energetickému stavu.

- Systematická chyba v určení $m_{\text{phot.}}$. Mnohé hviezdy, ktoré sa pre určenie $m_{\text{phot.}}$ používajú, maju veľký farebný index – v infračervenej oblasti, kde je kamera citlivá, vyžarujú podstatne viacej svetla ako očakávame.

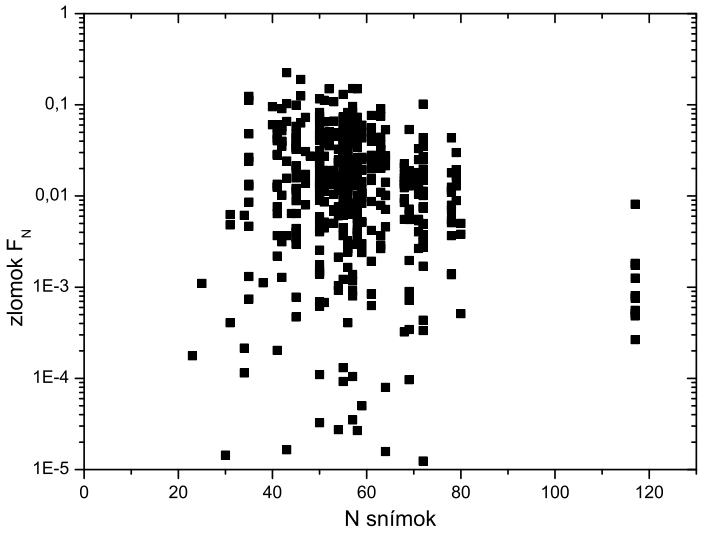


Graf 67 – *Zmena účinnosti $\eta_{\text{phot.}}$ v závislosti na výške h_c. Rozdiely medzi pravým a ľavým grafom sú minimálne.*

Pozrime sa na graf 67. Fotometrickú hmotnosť $\mu_{\text{phot.}}$ sme získali dvoma spôsobmi. Súbor MIM obsahuje pre každú stanicu jednu hodnotu $\mu_{\text{phot.}}$. Prvý spôsob (vľavo) zoberie hodnotu $\mu_{\text{phot.}}$ z prvej stanice a zvyšné ignoruje. Druhý spôsob (vpravo) zoberie všetky hodnoty $\mu_{\text{phot.}}$ z MIM súboru a spočíta ich strednú hodnotu

$$\log\langle\mu_{\text{phot.}}\rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\log\mu_{\text{phot.}i}\,. \tag{29}$$

Dôvod zavedenia logaritmického priemeru je predpokladaná exponenciálna závislosť $\mu_{\text{phot.}}$ na vstupných parametroch. Účinnost bude v skutočnosti ešte o niečo vyššia, ako je ukázané napr. v grafe 70.



Graf 68 – *Odhad zlomku F_N pre jednotlivé meteory.*

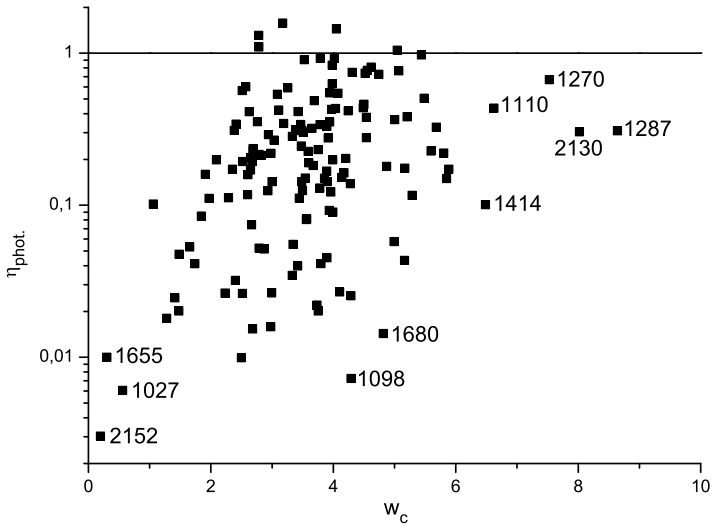
Prvým dôvodom je, že záznam AVI ukončený skôr, ako skončil dosvit zelenej čiary. V rovnici (8) a (12) získame celkovú energiu integráciou do nekonečna. Avšak v skutočnosti nám videozáznam končí už na snímku N. Zaveďme pomer F_N medzi celkovou energiou vyžiarenou v zelenej čiare a energiou, ktorú sme skutočne zaznamenali. Odhad zlomku F_N je v grafe 68. Vidíme, že pre niektoré (predovšetkým málo jasné) meteory dosahuje F_N až 20 %.

Druhým dôvodom je odstránenie snímky 1. Veľkosť tejto straty sa pohybuje v percentách, a je vyššia pre nižšie atmosférické výšky.

Graf 67 ukazuje účinnosť v závislosti na polohe maxima zelenej čiary h_c. Vpravo je zobrazená hodnota $\eta_{\text{phot.}}$ získaná postupom popísaným rovnicou (29). Niet vidieť podstatné rozdiely.

Všimnite si dva body s $\eta_{\text{phot.}} > 0{,}1$ vo výške 90 kilometrov (roh vľavo hore). Tieto body patria spekrám SZ171 a SZ1247. Prvé spektrum už bolo spomenuté na strane 67. Jedná sa o Orionidu s veľmi vysokou hodnotou K_B. Druhé spektrum je SZ1247. Meteor tohoto spektra veľmi dobre sedí k radiantu Leoníd. Jeho rýchlosť je iba 60 km/s. Za predpokladu, že by uvedené spektrum bola Leonida, posunie sa jej $h_c \to 105$ km.

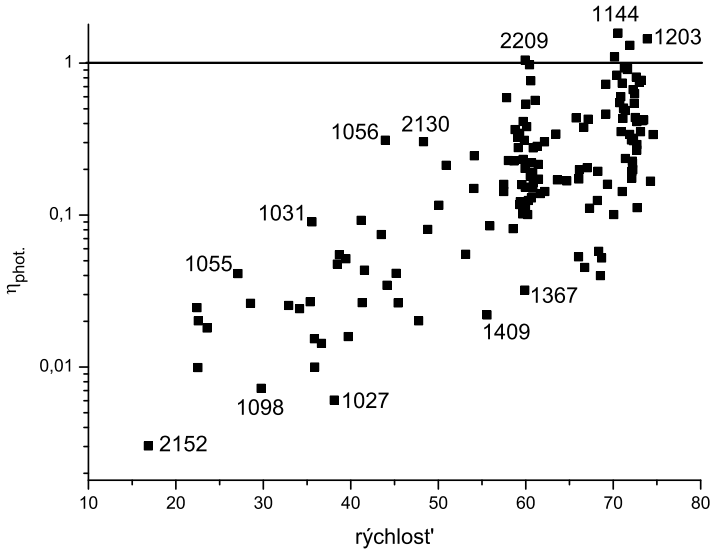
Ďalšie zaujímavé body sú tri body vľavo dole, s najnižšou hodnotou h_c v datasete. Patria spektrám SZ1373, SZ2152 a SZ2199. Prvé spektrum patrí bolidu s veľmi intenzívnou zelenou čiarou – Perzeida s absolútnou jasnosťou -6 až -10 magnitúd. Ďalšie dva meteorom s nízkou geocentrickou rýchlosťou – 17 km/s a 23 km/s.



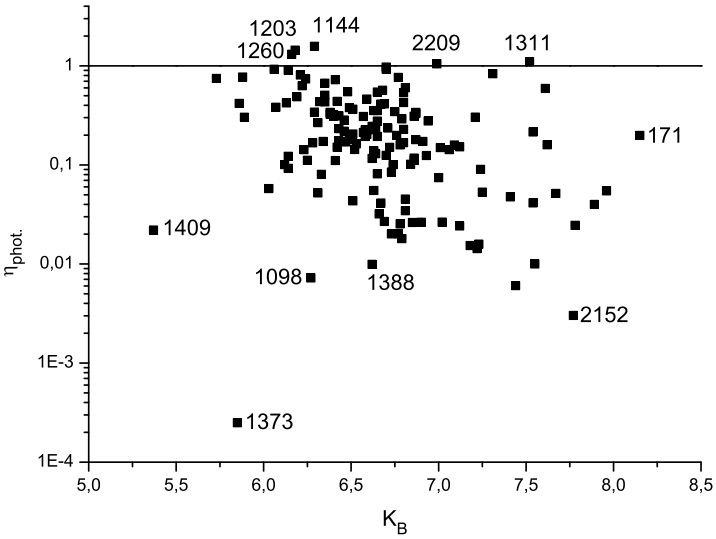
Graf 69 – *Závislosť účinnosti $\eta_{\text{phot.}}$ na položírke w_c.*

Graf 69 ukazuje účinnosť v závislosti na položírke w_c. Je zaujímavé, že meteory s vysokým w_c (a teda vysokým h_c, viď body vpravo hore v grafe 55.) sa v grafe 67 neprejavia ako samostatná skupina. Ich účinnosť zostáva pod 100 %. Z tejto malej špecifickej skupiny sa dá odhadnúť, že horná hranica účinnosti je minimálne 30–50 % (za predpokladu, že bola $\mu_{\text{phot.}}$ určená správne).

Graf 70 účinnosti v závislosti na rýchlosti meteoru. Dve skupiny pri 60 km/s a 70 km/s sú tvorené Perzeidami a Leonidami. Vidíme zreteľnú závislosť účinnosti na rýchlosti. Spektrum SZ1373 nie je z dôvodu prehľadnosti v grafe zobrazené.



Graf 70 – *Graf účinnosti v závislosti na rýchlosti meteoru.*



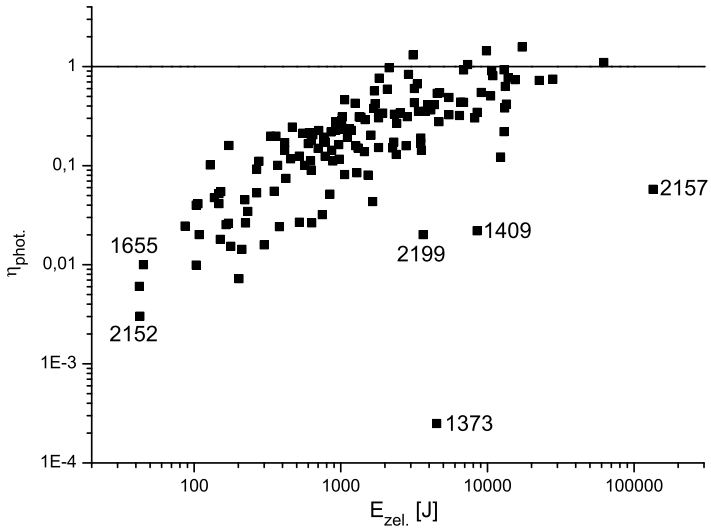
Graf 71 – *Graf účinnosti v závislosti na koeficiente K_B.*

Z meteorov, u ktorých $\eta_{\text{phot.}} > 1$ je jedna Perzeida, zvyšok sú Leonidy. Orionidy majú účinnosť pod 50 %.

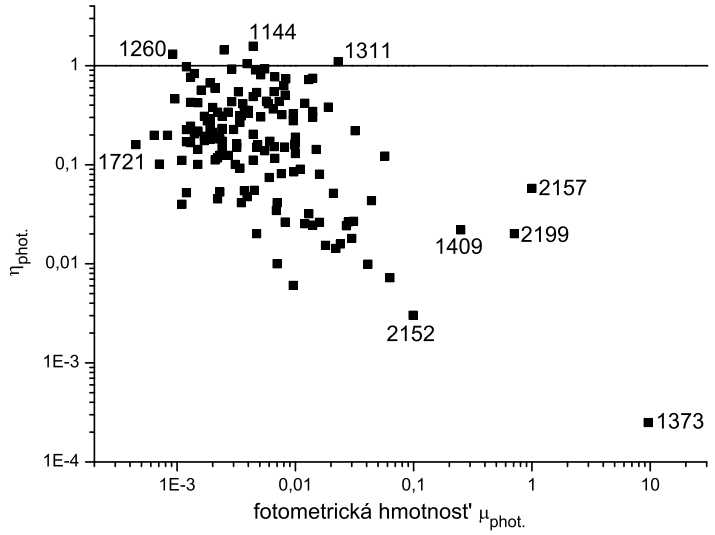
Graf 71 ukazuje závislosť účinnosti v závislosti na koeficiente K_B. Vpravo vyčnieva bod (outlier) spektra SZ1409 (bolid -5 mag.; $v = 56$ km/s). Pozoruhodné je, že jeho účinnosť je 2 %. Jeho hmotnosť je ale 0,25 g, čo je podstatne viacej ako u meteorov s $\eta_{\text{phot.}} > 1$, viď graf 73.

Graf 72 ukazuje závislosť účinnosti na celkovej energii vyžiarenej v zelenej čiare. Vidíme nárast účinnosti s narastajúcou energiou. Všimnite si čiaru $\eta_{\text{phot.}} = 1$. Bez nej by sme nevedeli, že existuje nejaký problém s príliš vysokou účinnosťou – indícia, že za problémom stojí neistota v určení $\eta_{\text{phot.}}$ a nie fyzikálny proces.

Graf 73 ukazuje závislosť účinnosti na fotometrickej hmotnosti materského telieska. Vyčnievajúce body patria, tak ako na iných grafoch, spektrám SZ1373, SZ1409, SZ2157 a SZ2199. Spoločnou vlastnosťou uvedených meteorov je veľmi vysoká hodnota A. Naznačuje to, že môže existovať mechanizmus vyčerpania



Graf 72 – *Graf účinnosti v závislosti na množstve energie vyžiarenej v zelenej čiare.*

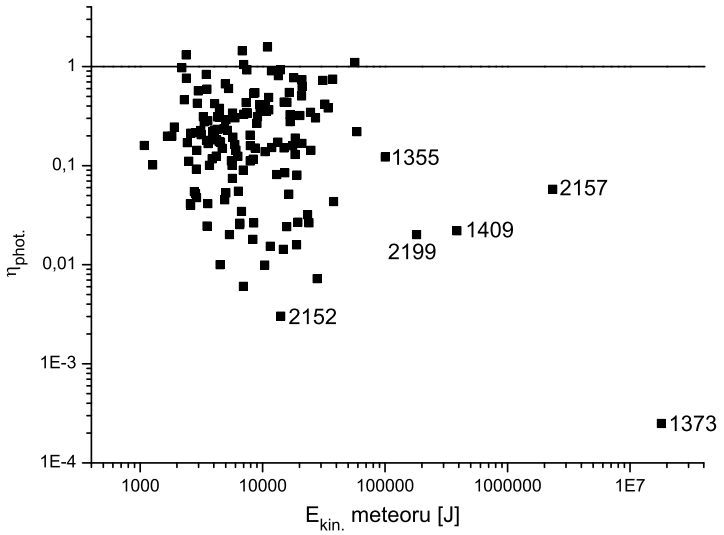


Graf 73 – *Graf účinnosti v závislosti na fotometrickej hmotnosti* $\mu_{\mathrm{phot.}}$ *meteoroidu. Hodnoty na osi x sú v gramoch.*

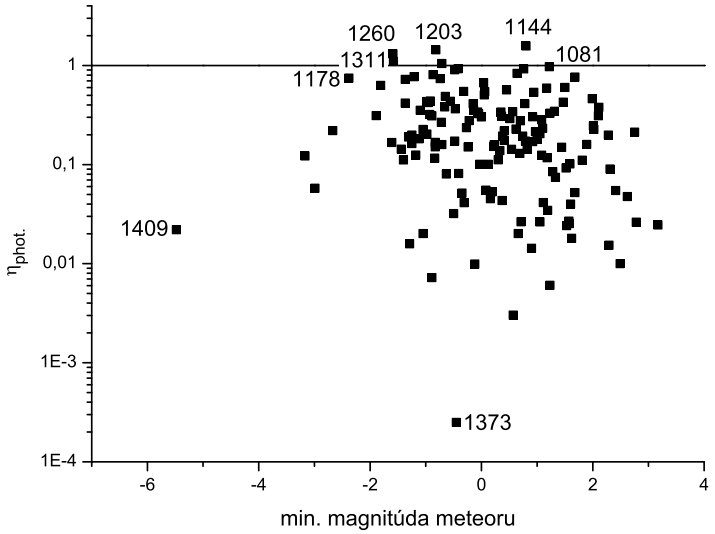
(depletion) zdroja energie vybudenia molekuly kyslíka, ktorý sa prejavuje u jasných meteorov. Iné vysvetlenie spočíva v predpokladu, že väčšina energie sa uvoľní vo výškach, kde je zelená čiara výrazne zhášaná. Toto vysvetlenie nemá oporu v pozorovaní. Konečné výšky uvedených meteorov nemaju tendenciu nachádzať sa nižšie ako ostatné – napr. 80 % meteorov končí nižšie ako SZ2157.

Graf 74 ukazuje závislosť účinnosti na kinetickej energii materského telieska. Vylúčme vyčnievajúce hodnoty vľavo. Potom na rozdiel od zjavného trendu v grafe 73 u kinetickej energie trend nepozorujeme. Znamenalo by to, že prosesy vedúce k vzniku zelenej čiary nám závisia na rýchlosti, ale nie na celkovej uvoľnenej energii.

Graf 75 je graf účinnosti v závislosti na minimálnej magnitúde meteoru. Rovnako ako v grafe 74 nevidíme žiaden výrazný trend.



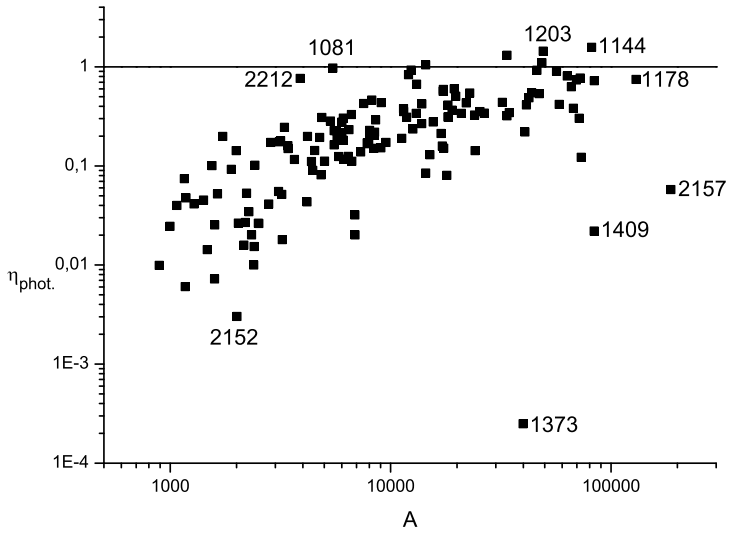
Graf 74 – *Závislosť účinnosti na kinetickej energii E_{kin} meteoroidu.*



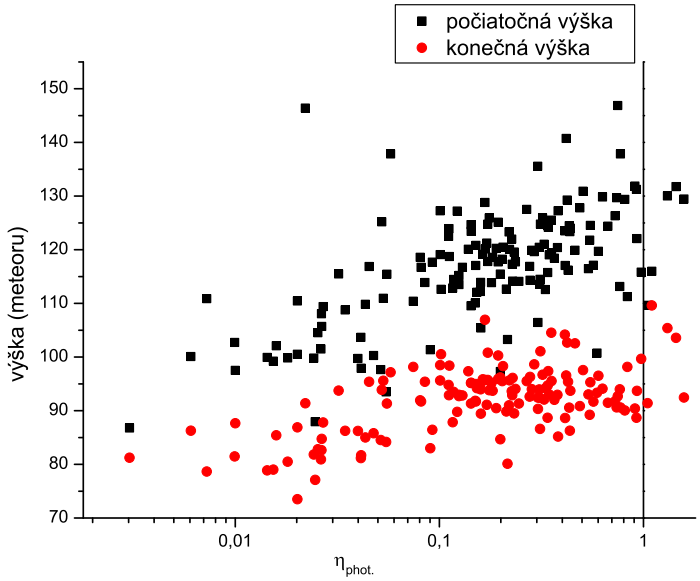
Graf 75 – *Graf účinnosti v závislosti na minimálnej magnitúde meteoru.*

Graf 76 je graf účinnosti v závislosti na amplitúde A. Všimnite si bodov, ktoré zodpovedajú spektrám SZ1081 a SZ2122. Obe spektrá sú redukované dobre a maximum je výrazné (pomer signál/šum ¿ 3). Ich amplitúda je určená dobre ($R^2 = 0{,}89$ resp. $R^2 = 0{,}62$). Ak odstránime vyčnievajúce hodnoty v spektre SZ2122, stúpne $R^2 \rightarrow 0{,}75$.

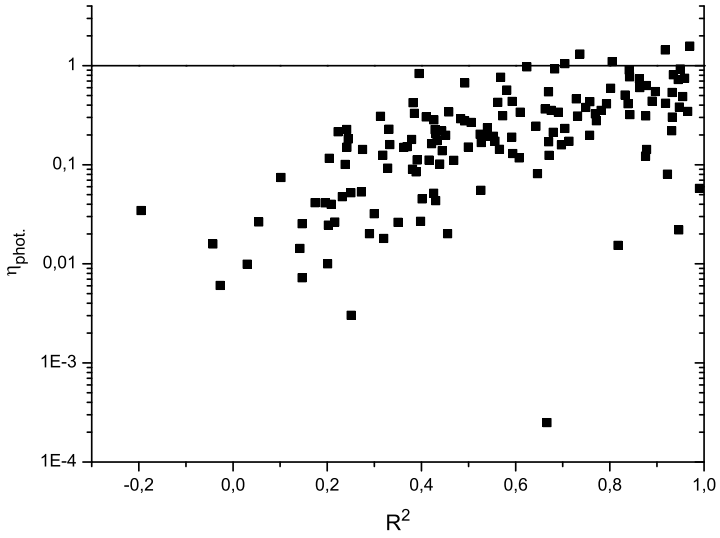
Znamená to, že amplitúda oboch spektier je určená správne. Sú symetrické a fit Gaussovou funkciou je vhodný. Rezídua nevykazujú systematický trend. Pri pohľade na graf 76 sa ale nachádzajú vyššie, ako by sme očakávali. Je preto pravdepodobné, že je chybne určená hodnota $\eta_{\mathrm{phot.}}$.



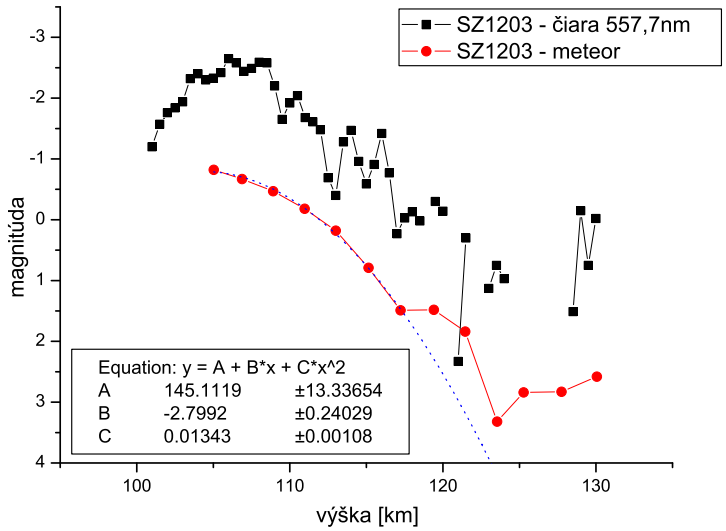
Graf 76 – *Graf účinnosti v závislosti na amplitúde A (viď rovnica (13)).*



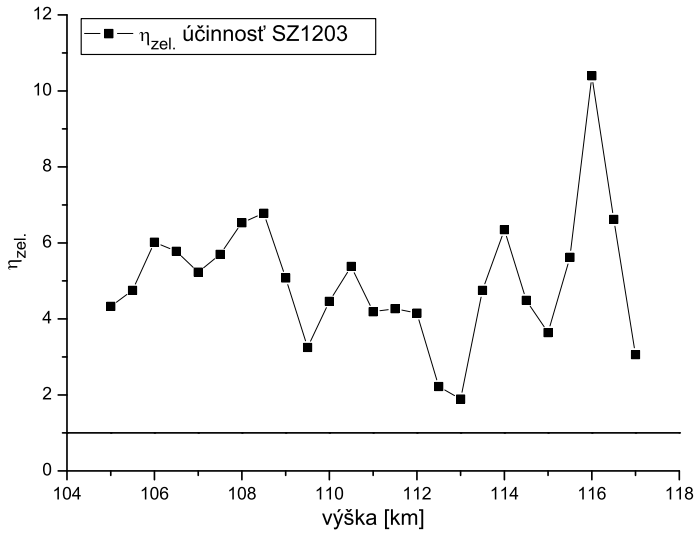
Graf 77 – *Porovnanie účinnosti pre začiatočné a konečné výšky meteorov. Vidieť trend, ako s narastajúcou výškou meteoru stúpa aj účinnosť procesu premeny energie.*



Graf 78 – *Graf účinnosti v závislosti na* R^2.



Graf 79 – *Porovnanie integrálnej magnitúdy meteoru a zelenej čiary SZ1203. Všimnite si, že nárast jasnosti meteoru kopíruje nárast jasnosti zelenej čiary.*

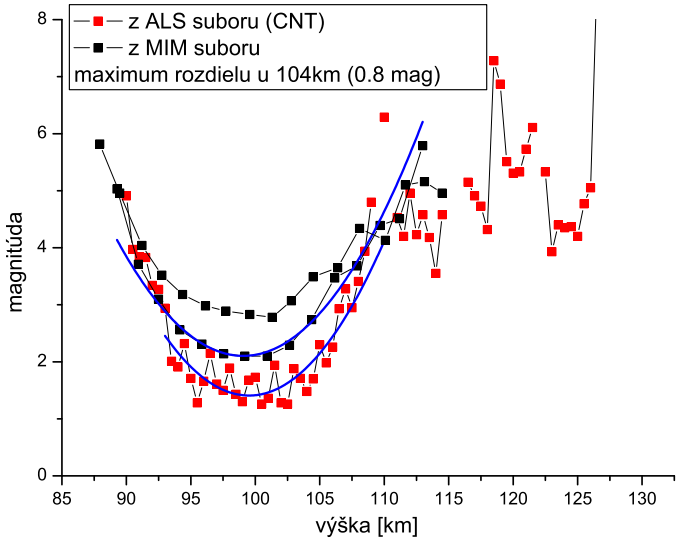


Graf 80 – *Pomer svetelnej energie vyžiarenej vo viditeľnom spektre a v zelenej čiare. Tento pomer sa drží počas celého intervalu výšok približne na* 1 : 5.

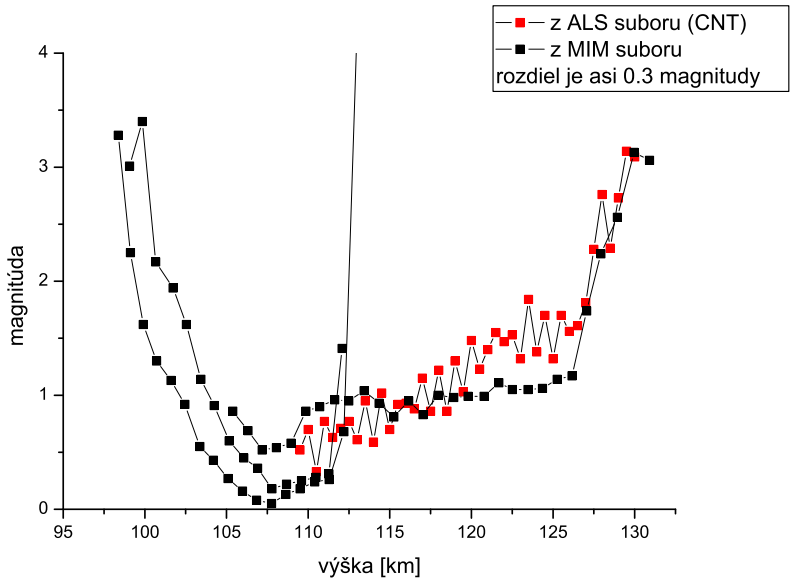
7.4 Magnitúda meteoru získaná z MIM súboru a meraná zo záznamu spektra

V MIM súbore je uložená informácia o magnitúde meteoru z niekoľkých staníc. Porovnajme tieto magnitúdy s magnitúdami získanými priamo zo spektrálneho záznamu. Zistíme presnosť určenia magnitúd a odhadom aj presnosť určenia fotometrickej hmotnosti.

Nie je veľa spektier, na ktorých je viditeľná zelená čiara aj samotný meteor. V grafe 79 je porovnanie jasnosti meteoru (z MIM súboru) a zelenej čiary (z INT súboru), ktorú meteor za sebou vyprodukoval. Množstvo energie vyžiarenej v zelenej čiare je podstatne vyššie ako množstvo vyžiarene priamo meteorom.



Graf 81 – *Porovnanie jasností meteoru 1056 z MIM súboru a zo spektrálneho TV záznamu, ktorý bol použitý k analýze zelenej čiary.*



Graf 82 – *Porovnanie jasností meteoru 1123 z MIM súboru a zo spektrálneho TV záznamu, ktorý bol použitý k analýze zelenej čiary.*

Graf 80 ukazuje pomer $\eta_{\text{zel.}} = \dfrac{E(557{,}7)}{E_{\text{kin.}}}$. Lineárny fit $\eta_{\text{zel.}} = A + B \cdot \text{výška}$ dáva $B = 0{,}003$ nulový sklon a absolútny člen $A = 5{,}4$.

Graf 81 ukazuje meteor 1056. Jeho účinnosť $\eta_{\text{phot.}} = 0{,}31$. Magnitúdy boli získané z MIM súboru a zo záznamu spektrálnej kamery. V MIM súbore sú síce chyby určenia magnitúd pod 0,1 – ale porovnaním dat z dvoch staníc vidíme, že

skutočná chyba je najmenej 0,5 magnitúdy (z tvaru grafu vyplýva, že sa jedná o systematické chyby). Magnitúda meteoru zo spektrálnej kamery je CNT.‡9

Graf 82 Spektrum SZ1123. Účinnosť $\eta_{\text{phot.}} = 0{,}51$. Všimnite si rozdielny sklon poklesu jasnosti meteoru s výškou pre data z MIM súboru a z videozáznamu TV kamery. Dôvod tohto rozdielu je nejasný.

‡9 Program `vyska_intenzita` produkuje na výstupe CNT a OUT subor. Prvý vracia spodnú hranicu jasnosti kontinua, druhý hornú hranicu. Ak sa použijú na nultý rád, vracajú jasnosť samotného meteoru.

8 Bolid 130807 – prípadová štúdia

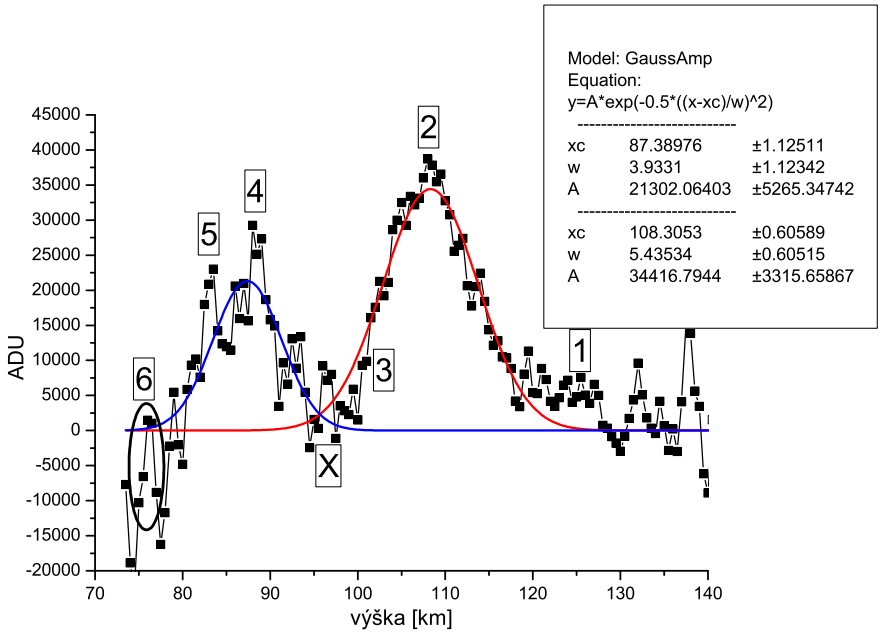
Bolid 130807 bol zaznamenaný 13. augusta 2007. Nepatrí do nami analyzovaného datasetu. Jeho mieste v tejto práci ale je – možno na ňom ukázať niektoré javy a charakteristiky týkajúce sa zelenej čiary, ktoré neboli v nami skúmanom datasete pozorované. Jeho výhodou je, že spektrum zelenej čiary je pozorované od samého začiatku až takmer po koniec, v intervale 50 kilometrov výšky. Takto veľký interval výšok by sme sa pôvodným vybavením nedal pozorovať. Použitá kamera má väčšie zorné pole ako pôvodná. Ucelené spektrum podobnej kvality nemáme k dispozícii od žiadneho iného meteoru. Je preto vhodné analyzovať ho samostatne.

8.1 Integrálna intenzita

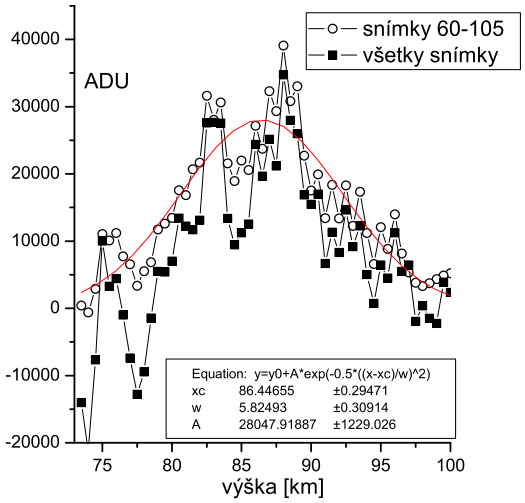
Graf 83 ukazuje integrálnu intenzitu meteoru. Krivka integrálnej intenzity má dve maximá. Parametre fitovanej Gaussovej krivky sú uvedené v rámci. Maximum prvej sa nachádza vo výške bežnej pre zelenú čiaru, ako bola nájdená u ostatných meteorov. Takéto maximum budeme nazývať *normálne maximum* a čiary *normálne čiary*. Druhé maximum sa nachádza vo výške 87 kilometrov, čo je podstatne nižšie ako by sa očakávalo (viď graf 54). V podobnej výške sa nachádza ešte niekoľko meteorov s podobnými parametrami. Zelené čiary týchto meteorov nazvime *mimoriadne čiary* a ich maximá *mimoriadne maximá*.

Niektoré všimnutiahodné časti grafu 83 sú na ňom zvýraznené.

- Všimnite si najprv ľavého okraja vo výške 75–80 kilometrov (graf 83). Pokles na okraji poľa nie je reálny. Je spôsobený problematickou redukciou na samej hranici zorného poľa. Skutočný koniec zelenej čiary nastáva dokonca mimo zorné pole. Celé spektrum má 250 snímok. V grafe 84 je zobrazené porovnanie intergálnej intenzity pre všetky snímky (dataset A) a pre snímky 60–105 (dataset B), na ktorých je viditeľná zelená čiara. Zatiaľčo smerom k stredu zorného poľa (na grafe 84 vľavo) sú hodnoty oboch datasetov porovnateľné (pričom B dáva o niečo vyššie výsledky ako A), na konci dráhy sa dataset A podstatne odchýli od B. Dôvod takéhoto správanie je neznámy. Predpoklad, že intenzita pozadia oblohy je počas celého pozorovania rovnaká, zrejme neplatí vždy. Pri vizuálnej inšpekcii záznam nepreukázal žiadne podozrivé nehomogenity. Podobné artefakty možno pozorovať u spektra SZ1031 v grafe 38. Môžu mať rovnaký pôvod.
- V Oblasti označenej číslom 1 je na zázname vidieť isté zjasnenie. Toto zjasnenie ale nepochádza z bežnej zelenej čiary. Ak je to skutočne žiarenie zelenej čiary a nie inej čiary s blízkou vlnovou dĺžkou, potom zdrojom atomárneho kyslíka musí byť priamo meteoroid. Atomárneho kyslíka nie je v uvedenej oblasti dostatok, naviac v rozmedzí 5 kilometrov výšky sa množstvo vyžiareného svetla nemení.

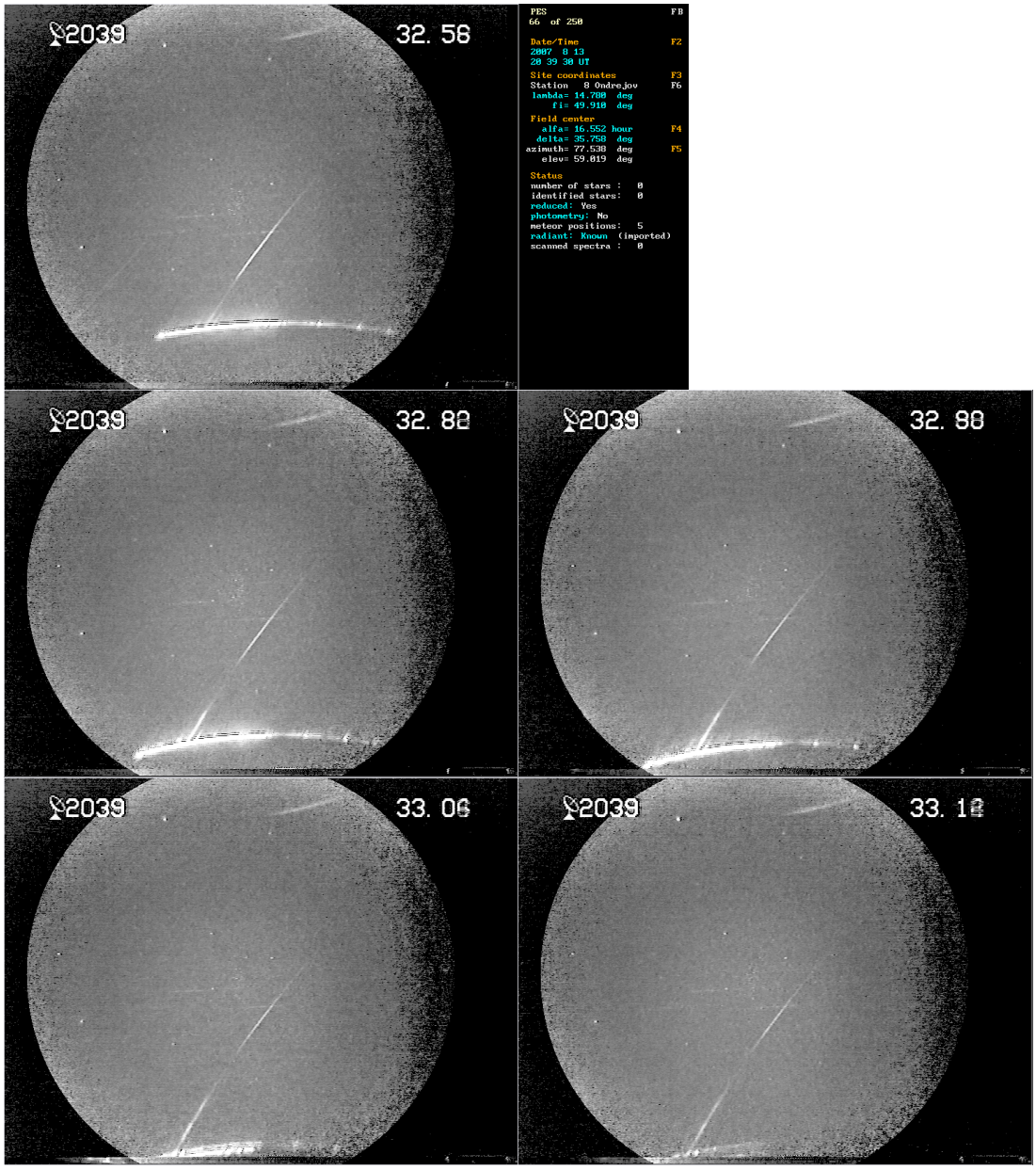


Graf 83 – *Integrálna intenzita v závislosti na výške bolidu z 13. 08. 2007. Do súčtu boli zahrnuté všetky snímky spektra.*



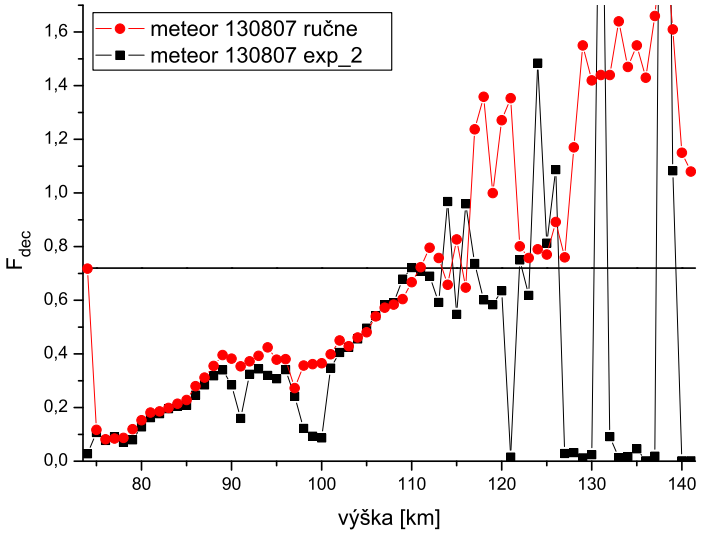
Graf 84 – *Integrálna intenzita v závislosti na výške bolidu z 13. 08. 2007. Fit patrí snímkam 60–105.*

- Číslo 2 popisuje normálne maximum zelenej čiary. Absolútna hodnota ADU je iba 40 000 – dôvodom je menšia hodnota $m_{\text{phot.}}$. Uvedená čiara v skutočnosti patrí k najsilnejším pozorovaným.
- Oblasť 3 ukazuje zostupnú hranu po normálnom maxime. Pokles je prudší ako by sme očakávali od Gayssovej funkcie.
- Znak X označuje oblasť prieniku kriviek oboch čiar. Takmer sa neprekrývajú.
- Píky 4 a 5 sa skutočne pozorovali (viď obr. 17, snímky 74, 78 a 80). Sú spôsobené zvýšeným množstvom uvoľnenej energie.

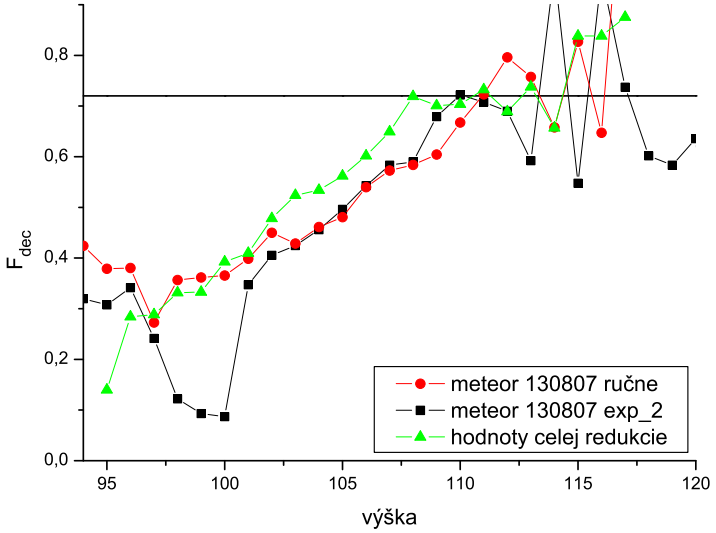


Obrázok 17 – *Poporade snímky 66, 72, 74, 78 a 80 spektra meteoru 130807. Normálna čiara je v strede snímiek, mimoriadna na spodnom okraji.*

- Zjasnenie pod číslom 6 je skutočné. Súvisí s výbuchom meteoru. Na obrázku 17 (snímky 78 a 80) zostala žiariť oblasť, v ktorej vybuchol meteor. Na snímke 80 je vidieť dohasínanie niekoľkých čiar, medzi nimi aj zelenej čiary. Nie je jasné, či sa jedná skutočne o čiaru 557,7 nm, alebo o dlhotrvajúce kontinuum či inú blízku čiaru. V oblastiach okolo 530 nm a 590 nm dosvit v kontinuu neprebieha.



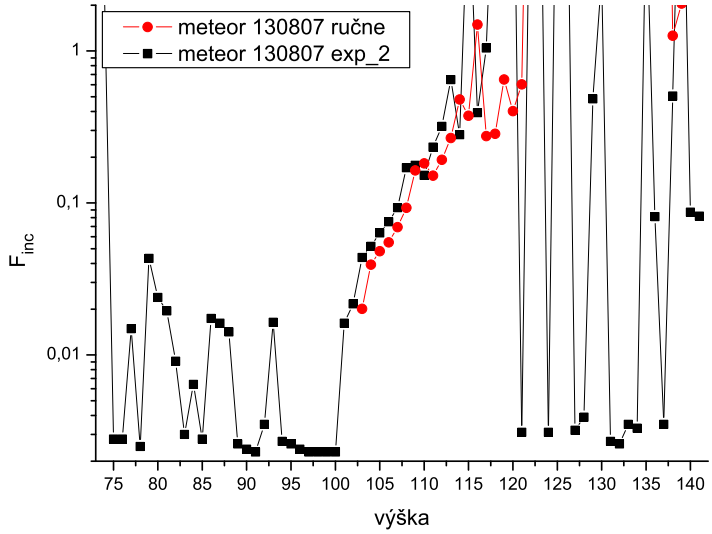
Graf 85 – *Porovnanie F_{dec} podľa rovnice (8) meteoru 130807 získanej dvoma rôznymi metódami.*



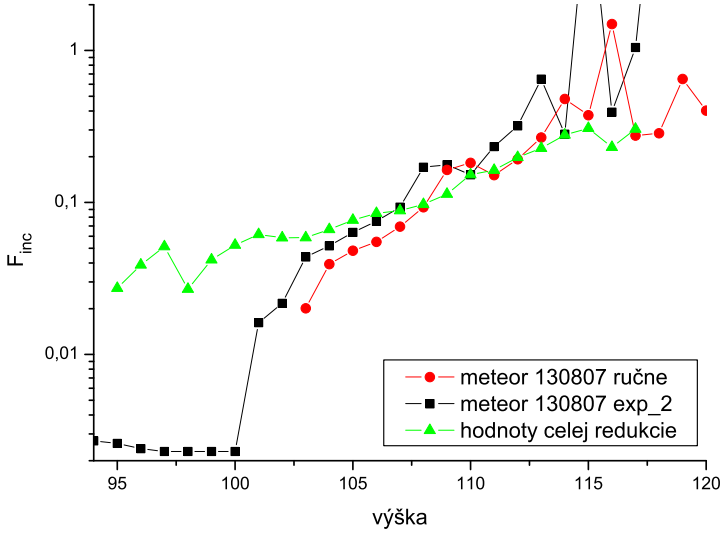
Graf 86 – *Porovnanie F_{dec} získanej u meteoru 130807 viacerými metódami v okolí výšok 100–115* km.

8.2 Rýchosť nárastu a poklesu intenzty zelenej čiary v závislosti na výške

Porovnajme F_{inc} a F_{dec} z dvoch výstupov. Prvý dataset získame z programu `exp_2`. Tento dataset nie je žiadnym spôsobom upravovaný, data v ňom sú prebraté z RES súboru. Druhý dataset bude upravovaný, ručne. Boli vypúšťané hodnoty, ktoré sa veľmi odlišovali od susedných hodnôt. Ďalej bol posúvaný nulový bod y_0 na osi y. Najmä vo vyšších výškach bolo nutné upravovať hodnotu y_0 – všimnite si k akým hodnotám konverguje dosvit vo výškach 117 km alebo 122 km v grafe 89. Taktiež boli vypúšťané body zo snímky 1, ak sa ich odstránením podstatne zlepšil fit (rovnica (8)).



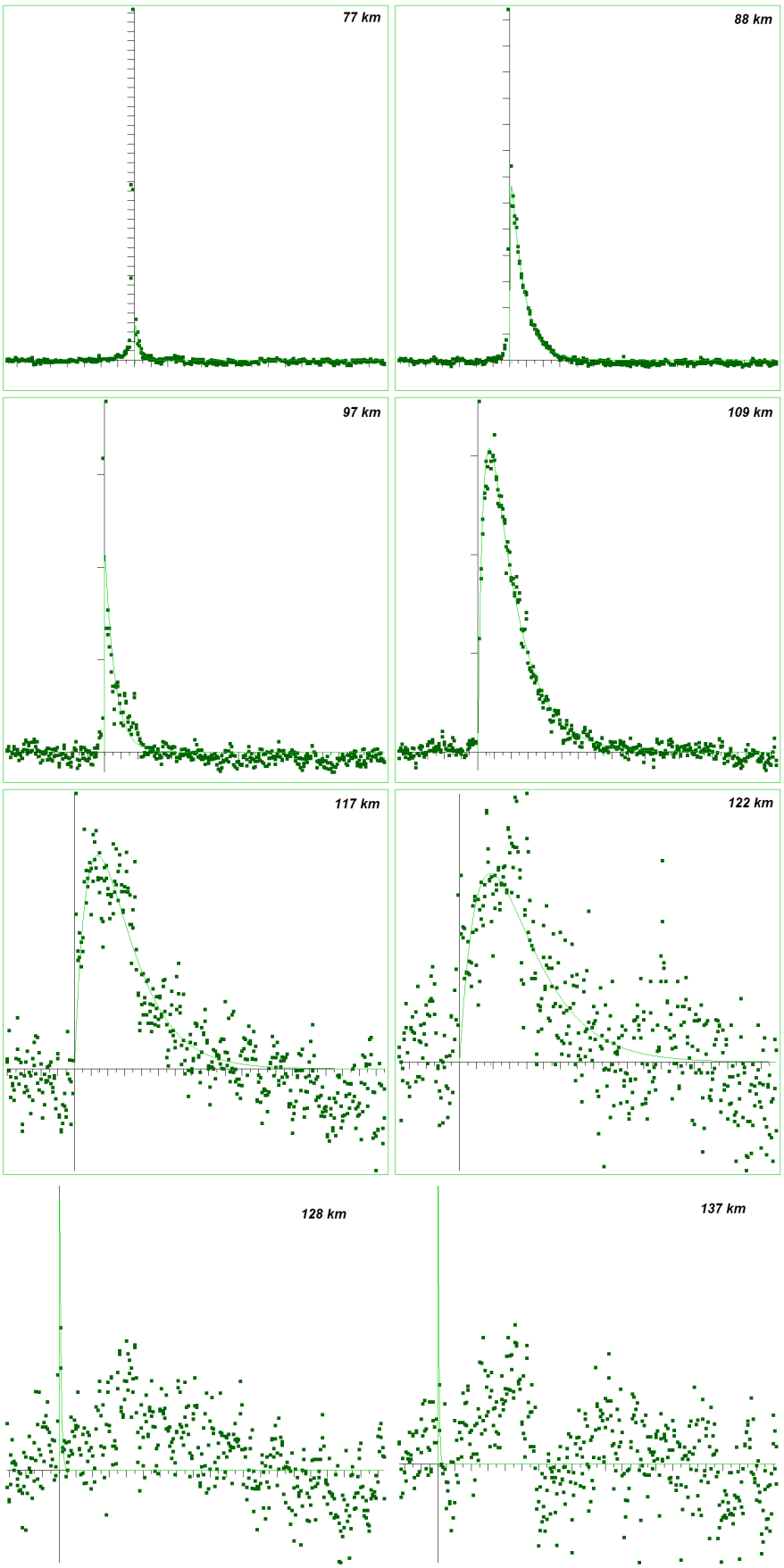
Graf 87 – *Porovnanie F_{inc} podľa rovnice (8) meteoru 130807 získanej dvoma rôznymi metódami.*



Graf 88 – *Porovnanie F_{inc} získanej u meteoru 130807 viacerými metódami v okolí výšok 100–115* km.

Grafy 85 a 86 porovnávajú F_{dec} medzi sebou, a tiež s hodnotami v grafe 22. Zhoda oboch metód je dobrá, s vynímkou oblasti 115–120 kilometrov a v okolí výšky 100 kilometrov.

Hodnoty nad 130 kilometrov možno vypustiť úplne. Na profiloch vo výške 128 a 137 kilometrov v grafe 89 je vidieť, že popis pomocou rovnice (8) je nevhodný – riešenia nedokonvergovali. Nárast a pokles intenzity je malý a je skôr spôsobený zmenami jasu pozadia ako zelenou čiarou v danej výške. Najväčšie zvýšenia intenzity nastali v čase, keď sa meteor nachádzal vo výške 75–80 kilometrov, t.j. v okamihu keď mal najväčšiu jasnosť. Zaujímavé je, že vo výškach nad 130 kilometrov možno pozorovať po terminácii meteoru prudký prepad jasnosti – až o 200 ADU. Intenzita prepadne dokonca pod nulovú úroveň (graf 89.137km). Hodnoty nad 130 kilometrov nebudú ďalej uvažované.



Graf 89 – *Časové rezy z programu* `exp_2`. *Zelenou čiarou sú ohraničené tie fity, ktoré dokonvergovali, bez ohraničenia fity, u ktorých nebola ani po maximálnom počte iterácii požadovaná presnosť. Jedná sa (v poradí zľava doprava, následne zhora nadol) o výšky 77, 88, 97, 109, 117, 122, 128 a 137 kilometrov.*

Horšia zhoda upravovaných výsledkov vo výškach 115–120 kilometrov je pochopiteľná na grafe 89 pre výšku 117 km. Približne 30 snímiek po prelete meteoru prudko poklesne intenzita zelenej čiary. Je to spôsobené tým istým javom ako pokles vo výškach nad 130 kilometrov. Spolu s nenulovou hodnotou y_0 je maximum zelenej čiary posunuté k neskorším časom a teda k vyššej hodnote F_{dec} ako v skutočnosti. Hodnota F_{dec} vyššia ako je doba života prechodu ${}^1\mathrm{S}_0 \rightarrow {}^1\mathrm{D}_2$ je z fyzikálneho hľadiska veľmi ťažko obhájiteľná.

Všimnite si, že oblasť 1 v grafe 83 je spoľahlivo identifikovateľná na grafe 85. Hodnoty F_{dec} nad dobou života prechodu ${}^1\mathrm{S}_0 \rightarrow {}^1\mathrm{D}_2$ sú spôsobené rovnakými dôvodmi ako zvýšené hodnoty 115–120 kilometrov. Na rozdiel od nich sa ale v tomto prípade po ručnom zásahu podarilo odstrániť vplyv zmeny jasu pozadia.

Porovnanie hodnôt F_{dec} v grafe 86 ukazuje rovnaký trend medzi hodnotami získanými u meteoru 130807 a hodnotami získanými z v kapitole 4. Líši sa iba absolúthej hodnote posunu. Dôvodov môže byť viacero – napr. chybná redukcia výšky o 2 kilometre, závislosť F_{dec} na jasnosti meteoru alebo systematická chyba spôsobená použitím iného objektívu. Ak si však uvedomíme, že v grafe 88 je sklon trend F_{inc} odlišný pre meteor 130807 a data z kapitoly 4, potom najpravdepodobnejším vysvetlením bude fyzikálne odlišné správanie sa meteoru 130807. Systematické chyby by F_{inc} posunuli, ale nestočili.

V grafe 85 je vo výškach 90–100 kilometrov vidieť plató. V graf 83 sa presne v tej výške nachádza prechod medzi oboma maximami zelenej čiary. Jeho pôvod je nejasný, možno bude súvisieť s ionizovanou trubicou za meteorom, ktorá je v týchto výškach zdrojom atomárného kyslíka.

9 Koncentrácia kyslíku O I v meteorickej stope

9.1 Základné termodynamické vzťahy

Zo stavovej rovnice ideálneho plynu a predpokladov kinetickej teórie možno odvodiť nasledovné konštanty popisujúce stav plynu:

Stredná voľná dráha

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}\,, \\ \lambda &= \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_0}\,, \end{aligned} \tag{30}$$

kde k je Boltzmannova konštanta, T teplota, p tlak a $\pi d^2/4$ účinný prierez zrážok (d priemer častice-molekuly). n_0 je objemová hustota častíc.

Stredná rýchlosť molekuly

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8k\ T}{\pi m_0}}\,, \tag{31}$$

kde m_0 je hmotnost jednej častice (molekuly/atómu).

Počet zrážok za sekundu n je rovný

$$\begin{aligned} n = \frac{\langle v \rangle}{\lambda} &= p \cdot \sqrt{\frac{16\pi d^4}{m_0 k\ T}}\,, \\ n &= n_0 \cdot \sqrt{\frac{16\pi d^4 k\ T}{m_0}}\,. \end{aligned} \tag{32}$$

Tabuľky 5–7 boli odvodené s použitím rovníc (30)–(32).

9.2 Odhad celkového počtu atómov kyslíka, ktoré žiaria

Pre energiu jedného fotónu platí

$$E_{(557{,}7\,\mathrm{nm})} = h \cdot \nu_{(557{,}7\,\mathrm{nm})} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{(557{,}7\,\mathrm{nm})}}\,, \tag{33}$$

kde ν je frekvencia a λ vlnová dĺžka. N fotónov

Vyjadrime si vyžiarenú energiu iba pomocou veličín, ktoré sú obsiahnuté v INT, MIM alebo RSP súbore. Z rovníc (27) a (26) dostaneme

$$E = 0{,}503 \cdot 10^{10} \cdot \exp\left(-0{,}9210 \cdot \left(18{,}901 + m_{\mathrm{phot.}} - 2{,}5 \log\left(I(\mathrm{ADU}) \cdot \sec z\right)\right)\right)$$

$$\mathrm{d}E = 4\pi R^2_{100\,\mathrm{km}} \cdot 10^{\frac{C_r - m_{\mathrm{phot.}}}{2{,}5}} \cdot I(\mathrm{ADU}) \cdot \sec z\ \cdot \mathrm{d}t \tag{34}$$

výška	hustota	stredny počet nukl.	tlak	stredná voľná dráha	počet zrážok/s	rýchlosť zvuku	teplota
[km]	[g/cm^3]		[Pa]	[m]	[1/s]	[m/s]	[K]
85	1,47E-008	28,76	9,51E-001	0,05	5574,44	329,33	225,2
90	7,14E-009	28,76	4,49E-001	0,11	2669,28	324,7	218,9
95	3,47E-009	28,69	2,06E-001	0,23	1261,91	315,4	206,1
100	1,63E-009	28,52	8,91E-002	0,49	572,41	302,69	188,7
105	6,89E-010	28,17	3,65E-002	1,14	241,4	298,13	180,8
110	2,65E-010	27,65	1,52E-002	2,9	98,58	310,37	192,3
115	1,03E-010	26,99	7,06E-003	7,32	42,75	339,59	224,7
120	4,29E-011	26,29	3,81E-003	17,07	20,83	385,96	282,8
125	2,03E-011	25,66	2,39E-003	35,24	11,63	444,56	366,2
130	1,15E-011	25,11	1,67E-003	60,73	7,48	492,82	440,4
135	7,36E-012	24,65	1,23E-003	93,29	5,24	530,28	500,5
140	5,03E-012	24,25	9,48E-004	134,29	3,86	562,2	553,4
145	3,60E-012	23,88	7,48E-004	184,45	2,95	589,9	599,9
150	2,68E-012	23,54	6,02E-004	244,62	2,31	614,06	640,8
200	2,05E-012	23,21	4,93E-004	315,71	1,86	635,59	676,9

Tabuľka 5 – *Termodynamické parametre atmosféry.*

Predpokladajme teraz, že žiarenie zelenej čiary prebieha v oblasti tvaru valca. Zaveďme si ohraničujúcu podmienku: vovnútri valca je prostredie homogénne, vonku vyžarovanie neprebieha. Tento valec má objem

$$V \ = \pi R_{\oslash}^2 \cdot \Delta h \cdot \sec z \,, \tag{35}$$

kde $R_{\oslash}$ je priemer valca a Δh rozdiel výšok.

Pre uvoľnenú energiu v tomto valci platí:

$$E = N \cdot E_{(557{,}7\,\mathrm{nm})} = nV \ \cdot h\nu_{(557{,}7\,\mathrm{nm})} = nV \ \cdot \mathcal{E} \,, \tag{36}$$

kde n je objemová hustota častíc atomárneho kyslíka v stope a $\mathcal{E}$ je energia jedného fotónu zelenej čiary.

Dosadením (34) a (35) do (36) dostaneme

$$n = \frac{4}{\mathcal{E}} \cdot \left(\frac{R_{100\,\mathrm{km}}}{R_{\oslash}} \right)^2 \cdot 10^{\frac{C_r - m_{\mathrm{phot.}}}{2{,}5}} \cdot \int \frac{I(\mathrm{ADU}) \cdot \mathrm{d}t}{\Delta h} \,. \tag{37}$$

h[km]	O[cm^{-3}]	N_2[cm^{-3}]	O_2[cm^{-3}]	He/cm^{-3}	Ar/cm^{-3}	H/cm^{-3}	N/cm^{-3}
80	4,03E09	2,40E14	6,36E13	1,68E09	2,70E12	4,96E07	5,64E04
85	5,17E10	1,17E14	3,06E13	8,49E08	1,29E12	1,32E08	8,86E04
90	2,45E11	5,69E13	1,46E13	4,47E08	6,05E11	7,89E07	1,40E05
95	5,06E11	2,68E13	6,62E12	2,46E08	2,69E11	4,34E07	2,13E05
100	5,58E11	1,14E13	2,61E12	1,41E08	1,03E11	2,54E07	2,97E05
105	4,19E11	4,40E12	8,93E11	8,84E07	3,33E10	1,58E07	3,90E05
110	2,68E11	1,71E12	2,92E11	6,22E07	1,03E10	1,02E07	5,14E05
115	1,63E11	7,11E11	9,96E10	4,78E07	3,37E09	6,54E06	6,86E05
120	1,00E11	3,33E11	3,87E10	4,05E07	1,27E09	4,21E06	9,31E05
125	6,92E10	1,86E11	1,86E10	4,05E07	5,85E08	2,86E06	1,36E06
130	5,12E10	1,17E11	1,04E10	4,48E07	3,08E08	2,03E06	2,02E06
135	3,95E10	7,80E10	6,38E09	4,82E07	1,75E08	1,48E06	2,93E06
140	3,14E10	5,47E10	4,20E09	4,82E07	1,06E08	1,11E06	4,12E06
145	2,55E10	3,96E10	2,90E09	4,63E07	6,71E07	8,59E05	5,56E06
150	2,11E10	2,95E10	2,08E09	4,39E07	4,41E07	6,80E05	7,20E06
200	5,39E09	3,15E09	1,66E08	2,85E07	1,85E06	2,14E05	1,53E07

Tabuľka 6 – *Tabuľka koncentrácií zložiek atmosféry. Použitý bol model atmosféry MSIS.*

h[km]	O	N_2	O_2	He	Ar	H	N
80	0,00 %	78,34 %	20,77 %	0,00 %	0,88 %	0,00 %	0,00 %
85	0,03 %	78,50 %	20,60 %	0,00 %	0,87 %	0,00 %	0,00 %
90	0,34 %	78,62 %	20,21 %	0,00 %	0,84 %	0,00 %	0,00 %
95	1,48 %	78,37 %	19,36 %	0,00 %	0,79 %	0,00 %	0,00 %
100	3,81 %	77,65 %	17,83 %	0,00 %	0,70 %	0,00 %	0,00 %
105	7,30 %	76,57 %	15,55 %	0,00 %	0,58 %	0,00 %	0,00 %
110	11,76 %	74,98 %	12,80 %	0,00 %	0,45 %	0,00 %	0,00 %
115	16,65 %	72,80 %	10,20 %	0,00 %	0,34 %	0,00 %	0,00 %
120	21,23 %	70,32 %	8,17 %	0,01 %	0,27 %	0,00 %	0,00 %
125	25,20 %	67,81 %	6,76 %	0,01 %	0,21 %	0,00 %	0,00 %
130	28,68 %	65,32 %	5,80 %	0,03 %	0,17 %	0,00 %	0,00 %
135	31,81 %	62,87 %	5,14 %	0,04 %	0,14 %	0,00 %	0,00 %
140	34,69 %	60,48 %	4,65 %	0,05 %	0,12 %	0,00 %	0,00 %
145	37,40 %	58,17 %	4,26 %	0,07 %	0,10 %	0,00 %	0,01 %
150	39,97 %	55,92 %	3,93 %	0,08 %	0,08 %	0,00 %	0,01 %
200	61,57 %	36,01 %	1,90 %	0,33 %	0,02 %	0,00 %	0,17 %

Tabuľka 7 – *Tabuľka percentuálnych koncentrácií zložiek atmosféry.*

9.3 Efektívny priemer valca zelenej čiary

Rovnica (37) má podstatný problém – u zelenej čiary nepoznáme priemer valca. Nie je jasné, aký veľký zlomok atomárneho kyslíka bude excitovaný. Počet excitovaných atómov možno spočítať – ale nie objem, v ktorom sa nachádzajú. Nazvime $R_{\text{ef.}}$ – *efektívny priemer* valca zelenej stopy. Je to priemer valca, v ktorom sa pri normálnom tlaku v danej výške vyskytuje rovnaké množstvo atomárneho kyslíka, ako je excitované v meteorickej stope podľa TV záznamu.

S využitím rovnice (37) dostaneme

$$R_{\text{ef.}}^2 = \frac{4}{\mathcal{E}} \cdot \frac{R_{100\,\text{km}}^2}{n_0} \cdot 10^{\frac{C_r - m_{\text{phot.}}}{2{,}5}} \cdot \sum \text{ADU} \cdot \frac{\tau_0}{\tau_h}\,, \tag{38}$$

pričom posledný člen prevádza počet pozorovaných fotónov na celkový počet excitovaných atomov. Tento pomer je pre danú výšku konštantný, viď graf 24. Konštanta $\tau_0 = 0{,}74$ je nezhášaná doba života hladiny $^1S_0$ a $\tau_h = F_{\text{dec}}$ doba života vo výške h (obe opravené o žiarivý prechod na 297,23 nm). Boli použité hodnoty z grafu 22.

Odhad skutočného priemeru ionizovanej stopy

Pre pomer medzi $R_{\text{ef.}}$ a $R_{\oslash}$ bude platiť (za predpokladu neadiabatickej expanzie)

$$R_{\text{ef.}} = R_{\oslash} \cdot \left(\frac{T_{\text{st.}}}{T_0}\right)^{2(\kappa-1)}\,, \tag{39}$$

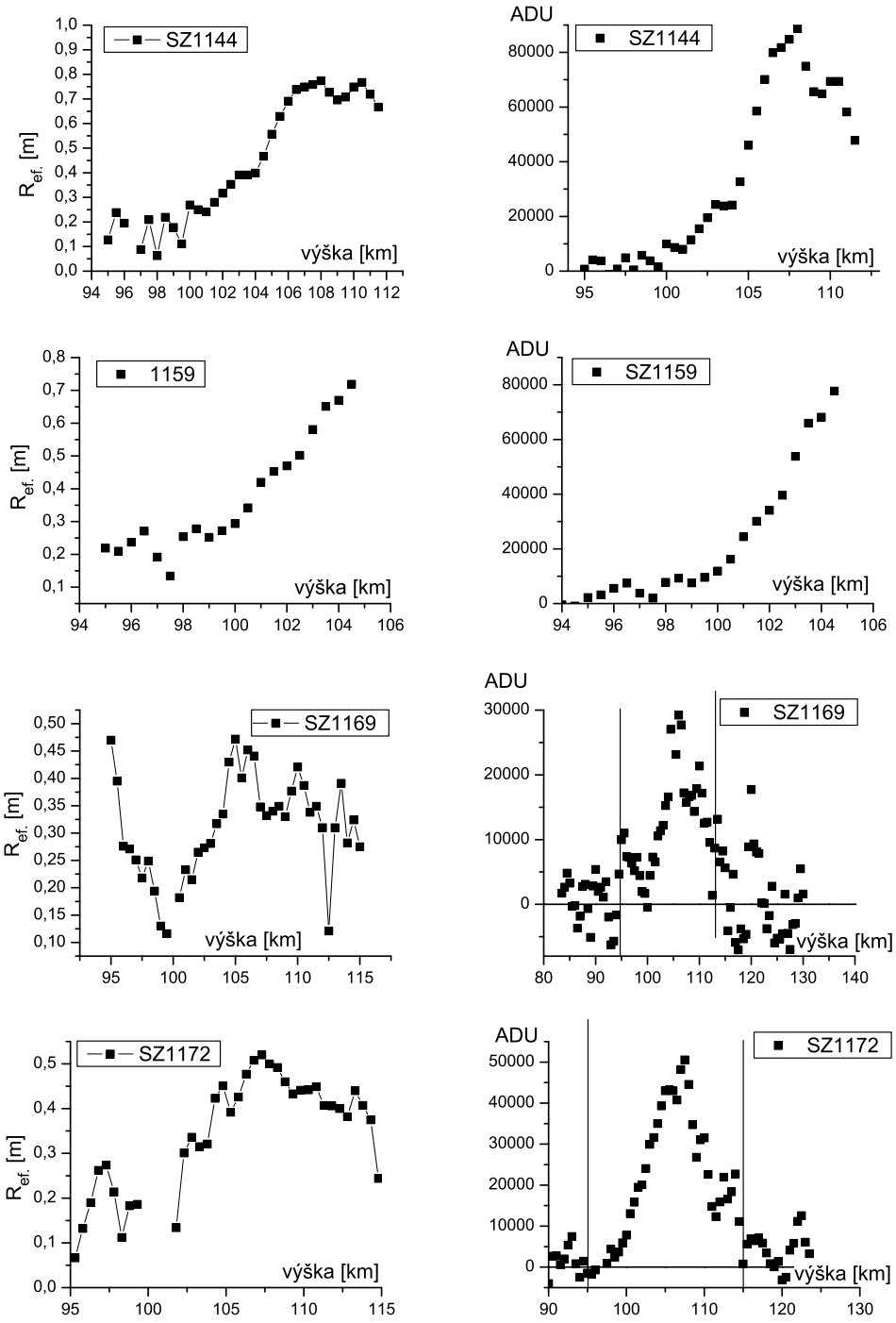
kde T_0 je teplota okolitej atmosféry a $T_{\text{st.}}$ teplota vovnútri stopy. Numerické výpočty (Zinn et. al., 1999) aj pozorovania (hollow structure, (Jenniskens, 2000)) naznačujú ostrý prechod medzi stopou a okolitou atmosférou. môžeme preto $T_{\text{st.}}$ považovať za konštantu vovnútri valca.

Uvedený adiabatický model nie je presný – v skutočnosti je pri expanzii treba použiť nerovnovážnu termodynamiku. Je ale predpoklad, že rádový odhad nám dá aj LTE model. Izobaricky model ($\gamma = 0$) dáva pomer priemerov 4–6, adiabatická expanzia ($\kappa = 5/3$) 7–14. V našom jednoduchom modeli chladnutia bol použitý relaxačný čas chladnutia 0,6 s a počiatočná teplota 6500 K. Neuvažovali sme plató fázu chladnutia – zaujímajú nás procesy ktoré sa dejú tesne po prelete meteoru, nie dlhotrvajúce stopy.

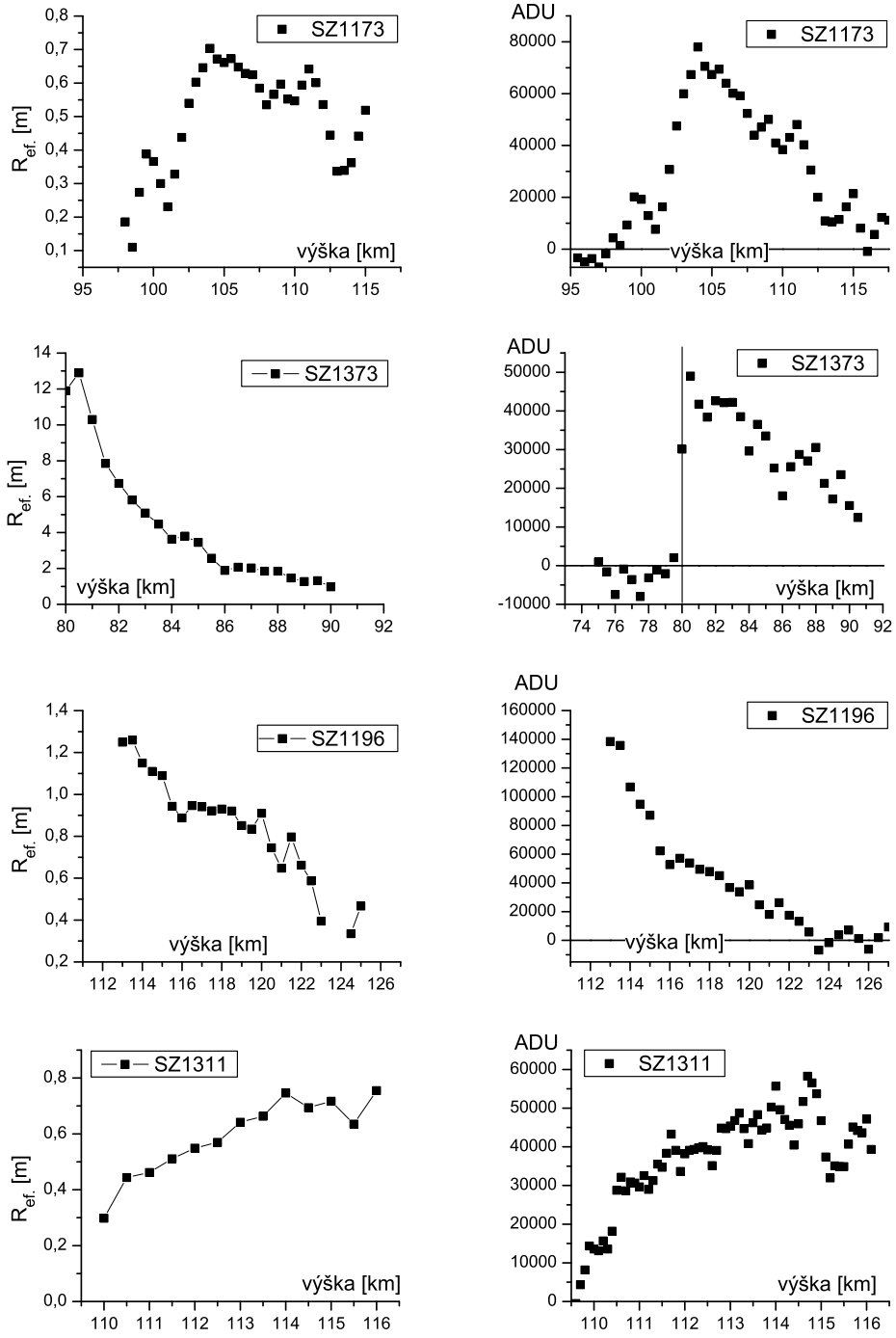
V grafoch 91 a 90 vidíme, že bežný priemer $R_{\text{ef.}}$ je 0,5–1,0 metra. Po Znamená to, že priemer excitovanej trubice zelenej čiary je rádovo 10 metrov pre meteory v uvedených grafoch. Veľmi jasný meteor 1373 je podstatne väčší, priemer excitovanej trubice vychádza približne 100 metrov.

9.4 Rýchlosť expanzie

Odhadnime rýchlosť expanzie zohriateho valca za meteoroidom. Budeme predpokladať jednak expanziu plynu, jednak difúziu spôsobenú Brownovým pohybom. Model predpokladá, že valec sa rozopne prakticky okamžite spôsobom, aby v každom bode bol rovnaký počet zrážok. Následne začne chladnúť, a proti zmršťovaniu už pôsobí iba difúzia.



Graf 90 – *Porovnanie intenzity zelenej čiary a zodpovedajúceho efektívneho priemeru* $R_{\mathrm{ef.}}$.



Graf 91 – *Porovnanie intenzity zelenej čiary a zodpovedajúceho efektívneho priemeru* $R_{\mathrm{ef.}}$.

Pre vzdialenosť od počiatku ušlú Brownovým pohybom platí

$$\frac{R^2}{t^2} = \frac{1}{t}\frac{N}{t}\lambda^2 .$$

Úpravami dostaneme vzťah

$$v^2 = \frac{1}{t}\frac{\langle v\rangle t}{\lambda t}\lambda^2 = \frac{\langle v\rangle \lambda}{t} . \tag{40}$$

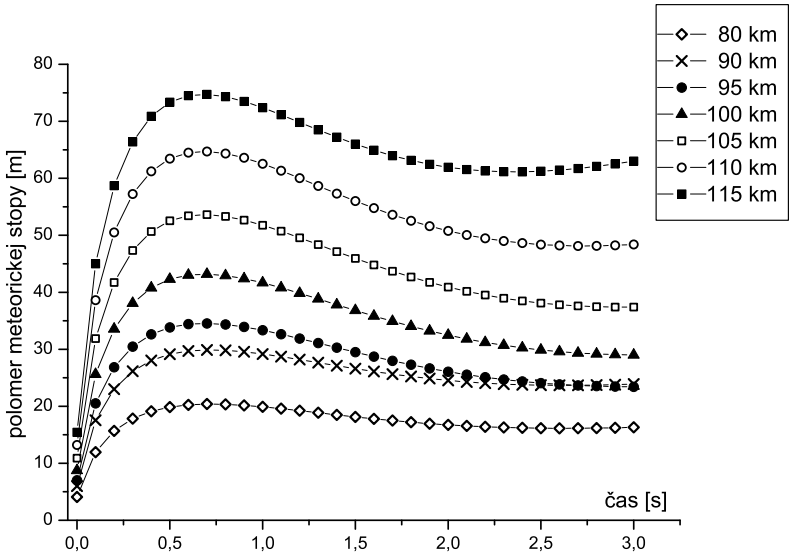
Po dosadeni (30) a (31) do (40) dostaneme rýchlosť expanzie

$$v \ = \sqrt{\frac{2k\ T}{\pi d\, t}\cdot\sqrt{\frac{\sqrt{2}}{m_0 p}}} \tag{41}$$

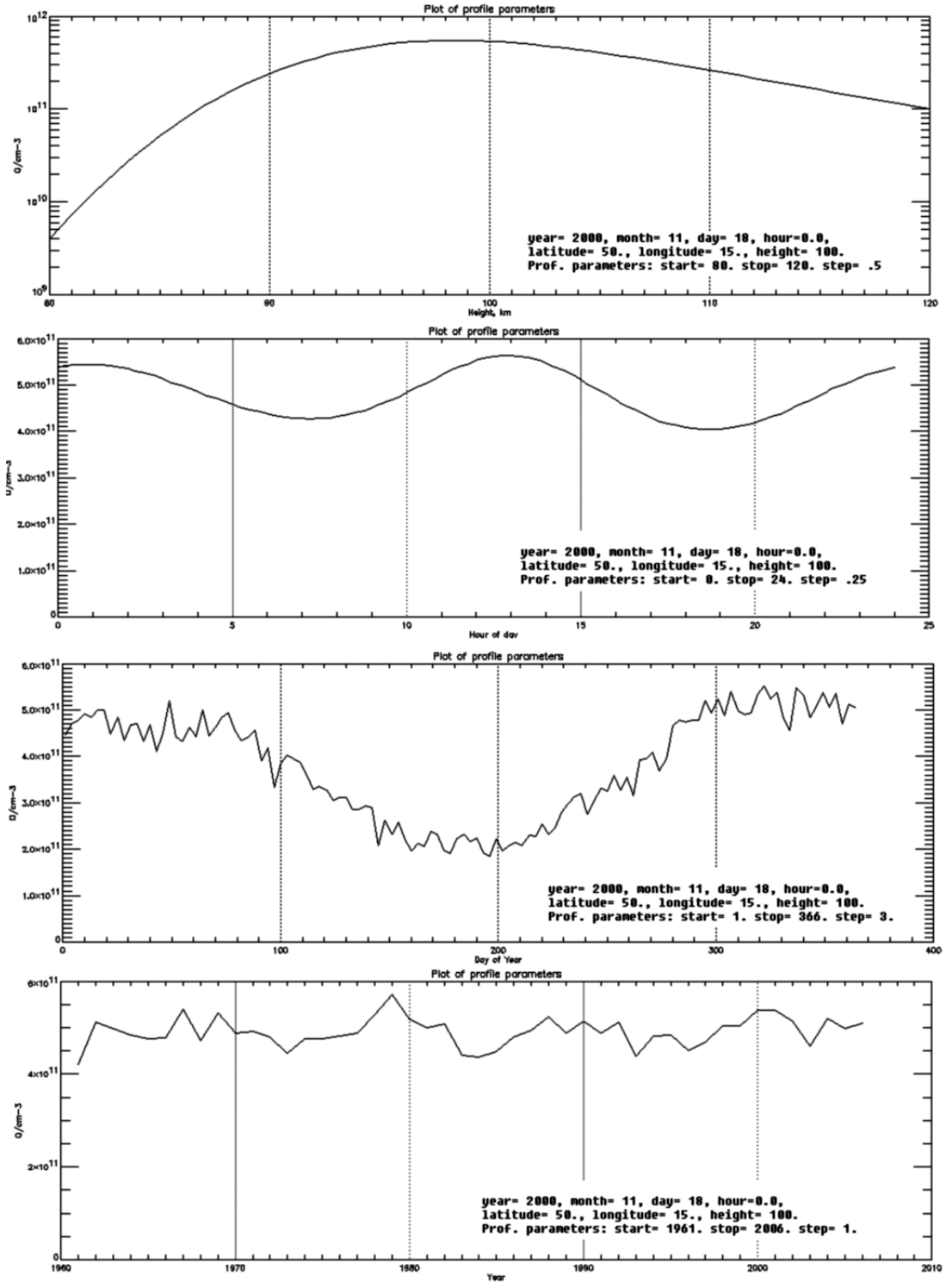
a pre polomer stopy po meteore

$$R_{\oslash} = \sqrt{\frac{2k\ Tt}{\pi d}\cdot\sqrt{\frac{\sqrt{2}}{m_0 p}}} . \tag{42}$$

Predpokladajme, že stopa chladne žiarením – možno uvažovať o exponenciálnom poklese teploty časom. Boli zanedbané všetky chemické reakcie. Počiatočná teplota a jej relaxačný čas boli získané extrapoláciou z práce (Zinn et. al., 1999). Použitím MSIS modelu a exponenciálneho poklesu teploty sme získali odhad polomeru meteoru s jasnosťou -7 magnitúd.



Graf 93 – *Graf závislosti polomeru meteorickej stopy na čase. Použitý model začínal z teploty 6500*K *s relaxačným časom 0,6 sekundy. Uvedený meteor má približne* -7 *magnitúd – výsledky teda môžeme porovnať s meteorom 1373. Polomer vychádza asi 5-krát menší voči modelu daného rovnicou (39).*



Graf 92 – *Zmeny koncentrácie atomárneho kyslíka s výškou a s časom, podľa modelu MSISE-90.*

9.5 Porovnanie výsledkov s publikovanými výsledkami

Práca (Borovicka, 1999) predpokladá priemer trubice (v ktorej vyžaruje ionizovaný stĺpec plynu okolo meteoroidu) rádovo ~ 10 cm. To je o 1–2 rády viacej, ako je priemer meteoroidu samotného (Leonida s jasnosťou 0 magnitúd). Meteoroid

(a Leonida obzvlášť) sa v atmosfére pri ablácii rozdrví na množstvo kúskov. Potvrdzuje to napr. práca (Spurný, 2000). Tieto môžu mnohonásobne zväčšiť aktívny objem a plochu a aktívny priemer swarmu. Druhá možnosť je, že rázová vlna udeľuje časticiam na jej čele transverzálnu zložku rýchlosti. Tie sa vďaka tomu dostanú ďalej od dráhy meteoroidu.

Pre veľmi jasné bolidy je priemer žiarivej stopy podstatne väčší, ako ukazuje práca (Zinn et. al., 1999). Pre meteor s jasnosťou −14 magnitúd dosahuje po 0,1 sekunde priemer približne 150 metrov. Takýto meteor v našom datasete nie je – najjasnejšie spektrum SZ1373 je od meteoru s absolútnou jasnosťou približne −6 magnitúd. Z tohoto meteoru boli dopočítavané konštanty nášho modelu.

Odhad priemeru zelenej stopy z nezávislého zdroja

Počas astronomickej expedície Vrchteplá 2007 bol pri fotografovaní hmloviny Kalifornia (IC 1499) zaznamenaný pomerne jasný meteor s výraznou zelenou stopou. Uhlové rozlíšenie snímky je podstatne vyššie ako pri TV pozorovaní na Ondřejove (7″). Vďaka tomuto vysokému rozlíšeniu bol určený nezávislý odhad priemeru trubice, v ktorej žiari zelená čiara.

Obrázok 18 – *Fotografia meteoru, zachyteného 15. 8. 2007 na expedícii Vrchteplá 2007. Expozičný čas 333* s. *Fotografované 2.16:02–2.21:35 fotoaparátom Canon EOS 350D DIGITAL. Autor snímku Ing. Marián Mičúch. Ekvivalentná citlivosť 400* ASA.

Jasná hviezda vpravo od stopy je ξ Per s jasnosťou 4 magnitúdy. Odhadnutá jasnosť meteoru zo snímky je 2–3 magnitúdy v spodnej časti (pri dobe trvania 0,1 sekundy). Presný čas preletu meteoru nie je známy. V okamihu preletu pozorovalo niekoľko pozorovateľov meteory vizuálne. Najjasnejší hlásený meteor v danom intervale má magnitúdu 2. Jedná sa preto o slabší meteor, ktorý by bol

pri TV pozorovaní na hrane sledovateľnosti. Meteor smeruje spätne k radiantu Perzeíd – jedná sa pravdepodobne o meteor tohoto roja.

Pri výške meteoru 105–110 kilometrov je jeho vzdialenosť 190 kilometrov. Priemer žiarivej oblasti zelenej čiary je v strede obrázku približne 300 metrov – z gradientu intenzity je zrejme, že časť posunu (ak nie celý) vznikla silným veterným prúdením. Pozdĺž čiary je oblasť, kde sa zelená čiara nachádza na oboch stranách – v tejto oblasti vietor nemal kolmú zložku r. Z jej rozmeru (2–5 obrazových bodov) vychádza priemer valca zelenej čiary 10–30 metrov. Toto je horná hranica odhadu – optika fotoaparátu neumožňuje vyššie rozlíšenie. Je ale zrejmé, že priemer valca zelenej čiary je väčší ako priemer valca oblasti žiarenia samotného meteoru. Zaujímavé je, že zelená čiara je vidieť ešte asi 1° (1–2 kilometre) nad miestom, kde začína žiariť samotný meteor.

Zelenú čiaru je v správnom mieste vidieť na oboch stranách jednoznačne. Znamenalo by to, že priemer trubice, v ktorom žiari atomárny kyslík, je podstatne väčšia ako odhaduje Koten v (Borovicka, 1999). To je zrejme spôsobené tepelným pohybom molekúl a difuziou.

10 Záver

V diplomovej práci bolo vybraných a spracovaných zhruba 200 spektier. U spektier bol skúmaný náras a pokles jasnosti v závislosti na výške, jasnoti meteoru a jeho rýchlosti. Bola určená celková energia vyžiarená v zelenej čiare a porovnaná s celkovou kinetickou energiou meteoru. Bol odhadnutý celkový počet žiariacich atómov kyslíka a odhadnutý priemer žiarivej stopy zo známych koncentrácií.

Úvod

V úvode bol popísaný objav zelenej zakázanej čiary atomárneho kyslíka 557,7 nm, najskôr v spektre žiarenia nočnej oblohy a v roku 1958 Hallidayom aj v spektre meteoru. Boli uvedené ďalšie miesta, kde je možné pozorovať zelenú čiaru – napr. v atmosfére Venuše a v spektre planetárnych hmlovín. V spektre žiarenia nočnej oblohy sa maximum zelenej čiary nachádza vo výške 90–110 kilometrov, čo je rovnaká výška ako pozorujeme u meteorov. Na vzorovom spektre boli ukázané najvýraznejšie čiary redukovaných spektier. Analyzované spektrá boli získané spektrálnou kamerou, a to na Ondřejove a v španielskej Lucainene (iba Leonidy 2000).

Dosiaľ publikované práce, týkajúce sa zelenej čiary

Prvé zmienky o zelenej čiare v spektre meteorov pochádzajú od Millmana z roku 1959. Z teoretickej stránky na mechanizmoch excitácie a zhášania zelenej stopy pracoval predovšetkým Baggaley v 70. rokoch. Popísal možné mechanizmy excitácie a zhášania zelenej čiary. Posledná práca pochádza z roku 1977, následne sa už k problematike nevrátil. Nikto ďalší v jeho práci nepokračoval. Skupina okolo Millmana, Cooka a Hemenwaya experimentálne skúmala zelenú čiaru, ich práce skončili v roku 1977. Neskôr už nebola publikovaná žiadna ďalšia podstatná práca týkajúca sa zelenej čiary v stope meteoru. Práce o zelenej čiare v polárnych žiarach a žiarení nočnej oblohy boli a sú publikované aj naďalej.

Redukcia videomateriálu

V kapitole bolo popísané technické vybavenie pre pozorovanie TV spektier. Bol podrobne popísaný spôsob redukcie TV záznamu až po výsledný ALS súbor. V podkapitole o identifikácii hviezd a redukcii polohy boli spomenuté sofistikované postupy vedúce ku kvalitnejšej redukcii ako doposiaľ používaný postup. Bol navrhnutý postup analýzy aj jednostaničných meteorov, merania však neboli z dôvodu homogenity súboru dát prevedené.

Časové rezy – parabola

V kapitole bola vyvinutá metóda hľadania maxima zelenej čiary pomocou parabolického fitu maxima. Metóda bola implementovaná v programe `p_par`. Za účelom vizualizácie výsledkov bola ako výstup implementovaná tzv. cipher mapa. Popis kvality fitu nebol robený pomocou štatistického rozptylu získeného metódou najmenších štvorcov (MNŠ), ale pomocou koeficientu determinácie R^2. Pri použití klasickej štatistiky MNŠ vychádzali niektoré chyby väčšie ako samotné hodnoty f: $\Delta f > f$. Bola diskutovaná hodnota $R^2_{\min}$, ktorá nám určuje hranicu, pod ktorou nám začínajú vznikať paraboly ako dôsledok náhodného šumu pozadia.

Z dôvodu vyhnutia sa systematickým chybám boli použité viaceré spôsoby výpočtu maxima paraboly. Z niekoľkých metód, ktoré vracali maximum zelenej čiary bola nakoniec zvolená stredná hodnota všetkých parabol v danej výške s $R^2 > 0{,}65$ počítaná priamo z definície Gaussovho rozdelenia – histogramom všetkých hodnôt bola fitovaná Gaussova funkcia a za maximum paraboly bol braný jej stred. Vyhli sme sa tým odľahlým hodnotám (outliers).

V tabuľke 3 vidieť, že hodnota R_0 sa pre rôzne spôsoby výberu $x_{\max}$ príliš nelíši. Hodnota R^2 je nejvyššia pre strednú hodnotu všetkých parabol (v danej výške). Tento postup bol použitý ako najhodnovernejší.

Maximum paraboly v závislosti na výške rastie exponenciálne. Pri porovnaní s metódou exponenciál je trend zachovaný, výsledky sa líšia v absolútnej hodnote. Naznačuje to systematickú chybu v jednej alebo druhej metóde.

Rovnako oneskorenie maxima zelenej čiary rastie exponenciálne na výške.

Časové rezy – exponenciála

V kapitole bola navrhnutá rovnica (8), ktorá má snahu fyzikálne popísať žiarenie zelenej čiary. Za účelom analýzy časových rezov touto funkciou bol vyvinutý program `exp_2`, ktorého výsledkom bolo grafické znázornenie fitu a textový výpis parametrov fitu vo formáte CSV. Boli teoreticky odvodené rovnice popisujúce čas a amplitúdu maxima zelenej čiary z parametrov funkcie (8).

Analýza závislosti maximálnej jasnosti zelenej čiary na výške ukázala niekoľko maxím. Maximum vo výške 98 kilometrov pravdepodobne nesúvisí so zelenou čiarou, ale s chybami určenia paramatrov zelenej čiary funkcie (8). Maximum vo výške 107 kilometrov je čiastočne ovplyvnené dodatočným maximom vo výške 114 kilometrov – toto maximum vzniká výberovým efektom.

S výškou rastie F_{inc} exponenciálne. Parameter F_{dec} rastie až do výšky 108 kilometrov, následne sa rast zastaví. Popis rastu je možný exponenciálou a priamkou. Oba fity dávajú rovnako dobrý popis (rovnaký počet parametrov, koeficientu determinácie aj sumy reziduí). Vo výške 108 kilometrov dosiahne F_{dec} teoretickej hodnoty doby života hladiny $^1\mathrm{S}_0$. Nad touto výškou nedochádza k zhášaniu, všetky prechody sú žiarivé.

Pomer F_{inc} a F_{dec} sú podľa grafu 24 priamo úmerné. Tento výsledok podstatne obmedzuje procesy, ktoré sú zodpovedné za vybudenie hladiny $^1\mathrm{S}_0$. Ako pravdepodobný proces sa preferuje dvojstupňový kyslíkový mechanizmus. Znamená to, že vo výškach pod 108 kilometrov je rýchlosť poklesu zelenej čiary po maxime priamo úmerná rýchlosti nárastu na prvých snímkach.

Bolo zistené, že u meteorov dochádza k prežiareniu – pravdepodobne je intenzita žiarenia meteoru tak silná, že presvetlí pozadie oblohy a zelená čiara sa zdanlivo vyskytne aj pred meteorom. Tento jav komplikuje analýzu časového rezu, pretože umelo zvyšuje intenzity zelenej čiary pár snímok po prelete meteoru.

Za účelom odstránenia systematickej chyby, keď stredná hodnota rezidua na prvej snímke vychádzala kladná, bola navrhnutá rovnica (12). Zistilo sa, že posun začiatku zelenej čiary je približne 0,4 snímky a nezávisí na výške. Bola zistená korelácia medzi hodnotou shift a funkčnou hodnotou funkcie (12) v bode 0. Bolo navrhnutých niekoľko vysvetlení, prečo dochádza k zdanlivému začiatku zelenej čiary pred meteorom.

Výsledky získané z rovníc (8) a (12) sú takmer identické. To naznačuje, že závislosti F_{inc} a F_{dec} sú s výškou určené správne.

Porovnaním získanej hodnoty F_{dec} s publikovanými prácami bolo zistené, že výsledky sa podstatne líšia.

Integrálna intenzita

Pri hľadaní parametrov uvoľňovania energie pozdĺž dráhy letu meteoroidu bola použitá rovnica (13) s okrajovou podmienkou $y_0 = 0$, s tým, že u jasných meteorov sa pozrieme na to, ako veľmi sa reálna hodnota pozadia líši od nuly. Hranicu medzi jasným a slabým meteorom je podľa grafu 43 pri 65 snímkoch. Alternatívnym riešením je porovnať fity s y_0 voľným a $y_0 = 0$ a potom rozhodnúť, či sú okraje intenzity fyzikálne realistické. Gaussova funkcia dobre popisuje väčšinu integrálnych intenzít.

Bol vyvinutý program `vyska_intenzity`, ktorý analyzuje a počíta integrálne intenzity zelenej čiary v čase. Vedľajším produktom je niekoľko ďalších pomocných súborov, ktoré slúžia k dodatočným analýzam.

Boli diskutované vzájomné závislosti parametrov integrálnej intenzity. Bolo zistené, že zelenú čiaru produkujú meteory všetkých rýchlostí, ale s klesajúcou rýchlosťou jej jasnosť klesá. To je dôvod, prečo sa doposiaľ tvrdilo, že zelenú čiaru produkujú iba rýchle meteory. Pokles amplitúdy zelenej čiary s rýchlosťou (a následný pokles pomeru signál/šum) je dôvod, prečo nie je pozorovaná u pomalších meteorov.

Vzájomná závislosť parametrov Gaussovej funkcie (13) je nasledovná: w_c mierne rastie s A. Výška h_c tiež rastie, ale rýchlejšie. Položírka w_c nezávisí na h_c, viď graf 55. Z analýzy parametra K_B vyplynulo, že krehkejšie meteory s vyšším začiatkom žiarenia majú väčšiu amplitúdu A.

S rastúcou hmotnosťou meteoroidu rastie ako amplitúda A, tak položírka w_c zelenej čiary. Naopak výška maxima intenzity h_c sa s rastúcou hmotnosťou nemení. Znamená to, že zelená čiara čerpá atomárny kyslík z okolitej atmosféry. Tento záver podporuje aj nezávislosť parametrov A, w_c, h_c na sklone dráhy meteoroidu v atmosfére $\sec z$.

Energia uvoľnená v zelenej čiare

V kapitole bola zavedená účinnosť premeny kinetickej energie meteoru $\eta_{\mathrm{phot.}}$. Bolo zistené, že pre niektoré meteory je $\eta_{\mathrm{phot.}} > 1$. Pravdepodobne za to môže nepresnosť v určení fotometrickej hmotnosti $\mu_{\mathrm{phot.}}$,. Tá je závislá na svetelnej účinnosti, ktorej presné hodnoty doteraz nepoznáme. Naviac, priamo v MIM súbore sa pre niektoré meteory fotometrické hmotností z dvoch rôznych staníc líšia aj o viac ako jeden rád.

Bolid 130807 – prípadová štúdia

Veľmi jasný meteor 130807 umožnil preskúmať spektrum meteoru od samotného začiatku po úplný koniec. Bolo zistené, že existujú dva druhy čiar – normálna a mimoriadna. Krivka integrálnej intenzity je v oboch prípadoch dobre popísaná Gaussovou funkciou. Dosvit zelenej čiary je dobre popísaný parametrom F_{dec}, ktorý sa s výškou znižuje a vykazuje rovnaký trend ako súbor dát z rokov 1998–2003. Parameter F_{inc} má odlišný sklon ako priemerné hodnoty získané zo

spektier z rokov 1998–2003. Výsledky získané analýzou tohoto meteoru súhlasia s predchádzajúcimi výsledkami.

Koncentrácia kyslíku O I v meteorickej stope

Boli odvodené vzťahy popisujúce vlastnosti plynu vo výškach, v ktorých žiaria meteory. Na základe koncentrácií z modelu MSIS boli sopočítané tabuľky, ktoré určujú termodynamiské parametre atmosféry v rozmedzí 85–150 kilometrov. Bol odhadnutý celkový počet atómov kyslíka podieľajúci sa na vyžarovaní zelenej čiary. Na základe jednoduchého teoretického modelu a dvoch rôznych pozorovaní bol odhadnutý priemer, v ktorom žiari zelená čiara – desiatky metrov pre pozorované spektrá meteorov.

Literatura

Baggaley, W. J. (1976): The excitation of the oxygen metastable O I/1S/ state in meteors. *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin* **vol. 27**, p. 173–181.

Baggaley, W. J. (1976): The quenching of meteoric O I forbidden radiation. *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin* **vol. 27**, p. 296–300.

Baggaley, W. J. (1977): The red afterglow in meteor wakes. *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin* **vol. 28**, p. 356–359.

Baggaley, W. J. (1977): The velocity dependence of meteoric green line emission. *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin* **vol. 28**, p. 277–280.

Baggaley, W. J. (1978): Observational Data Concerning the Meteoric 5577 Å Emission. *Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia* **vol. 29**, p. 59–61.

Baggaley, W. J.; Cummack, C. H. (1977): The behavior of the meteoric O I 5577 A emission. *Canadian Journal of Physics* **vol. 55**, p. 1379–1383.

Baldwin, J. A.; Crotts, A.; Dufour, R. J.; Ferland, G. J.; Heathcote, S.; Hester, J. J.; Korista, K. T.; Martin, p. G.; O'dell, C. R.; Rubin, R. H.; Tielens, A. G. G. M.; Verner, D. A.; Verner, E. M.; Walter, D. K.; Wen, Z. (1996): Physical Conditions in Low Ionization Regions of the Orion Nebula. *Astrophysical Journal Letters* **vol. 468**, p. L115–L118.

Bates, D. R. (1978): Forbidden oxygen and nitrogen lines in the nightglow. *Planetary and Space Science* **vol. 26**, p. 897–912.

Bates, D. R. (1988): Excitation of 557.7 nm O I line in nightglow. *Planetary and Space Science* **vol. 36**, p. 883–889.

Borovicka, J.; Stork, R.; Bocek, J. (1999): First results from video spectroscopy of 1998 Leonid meteors. *Meteoritics & Planetary Science* **vol. 34**, p. 987––994.

Borovička, J. a kol. (2008): Stručný návod pro měření meteorů programem RESPEC. *nepublikováno, průběžně aktualizováno*

Borovička, J.; Koten, P.; Spurný, P.; Boček, J.; Štork, R. (2005): A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids. *Icarus* **vol. 174**, p. 15–30.

Bouchez, A. H.; Brown, M. E.; Schneider, N. M. (2000): Eclipse Spectroscopy of Io's Atmosphere. *Icarus* **vol. 148**, p. 316–319.

Capria, M. T.; Cremonese, G.; Bhardwaj, A.; de Sanctis, M. C. (2005): O(^1S) and O(^1D) emission lines in the spectrum of 153P/2002 C1 (Ikeya-Zhang). *Astronomy and Astrophysics* **vol. 442**, p. 1121–1126.

Capria, M. T.; Cremonese, G.; de Sanctis, M. C.; Boattini, A.; Epifani, E.; Lorenzi, V.; Saba, L.; Licandro, J. (2006): High Resolution Monitoring of 9P/Tempel 1 with SARG at La Palma During the Flyby of Deep Impact. *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 13–17, 2006, League City, Texas,* abstract no. 1275 .

Ceplecha, Z. (1988): Earth's influx of different populations of sporadic meteoroids from photographic and television data. *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin* **vol. 39**, 221–236.

Ceplecha, Z. (1996): Luminous efficiency based on photographic observations of the Lost City fireball and implications for the influx of interplanetary bodies onto Earth. *Astronomy and Astrophysics* **vol. 311**, p. 329–332.

Elvey, C. T.; Swings, P.; Linke, Walter (1941): The Spectrum of the Night Sky. *Astrophysical Journal* **vol. 93**, p. 337–348.

Halliday, I. (1958): Forbidden Line of O I Observed in Meteor Spectra. *Astrophysical Journal* **vol. 128**, p. 441.

Hart, W. M. (1992): Adles's Physiology of the Eye, Clinical Application. *Mosby Year Book, Inc.,* 9. edition.

Hawkes, R. L.; Jones, J. (1975): A quantitative model for the ablation of dustball meteors. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices* **vol. 173**, p. 339–356.

Hays, p. B.; Walker, J. C. G. (1966): Doppler profiles of the 5577 Å airglow. *Planetary and Space Science* **vol. 14**, p. 1331–1337.

Hedin, A. E. (1992): MSISE model (1990). *Planetary and Space Science* **vol. 40**, p. 556.

Hemenway, C. L.; Swider, A.; Bowman, C. (1971): Meteor spectroscopy using an image orthicon. *Can. J. Phys.* **vol. 49**, p. 1361–1364.

Jenniskens, P.; Nugent, D.; Plane, J. M. C. (2000): The Dynamical Evolution of a Tubular Leonid Persistent Train. *Earth, Moon, and Planets* **vol. 82/83**, p. 471–488.

Jenniskens, P. (1994): Meteor stream activity I. The annual streams. *Astronomy & Astrophysics* **vol. 287**, p. 990–1013.

Koten, P.; Borovička, J.; Spurný, P.; Betlem, H.; Evans, S. (2004): Atmospheric trajectories and light curves of shower meteors. *Astronomy and Astrophysics* **vol. 428**, p. 683–690.

McConkey, John W.; Kernahan, John A. (1969): Absolute transition probability measurement for the electric quadrupole 5577 Å auroral green line. *Planetary and Space Science* **vol. 17**, p. 1297–1306.

McNaught, R. H.; Asher, D. J. (1999): Leonid Dust Trails and Meteor Storms. *WGN, Journal of the International Meteor Organization* **vol. 27**, p. 85––102.

Meyer, J. A.; Setser, D. W.; Stedman, D. H. (1969): Note: Excitation of the Auroral Green Line of Atomic Oxygen ($^1S \rightarrow ^1 D$) by $N_2(A^3 \sum_u^+)$. *Astrophysical Journal* **vol. 157**, p. 1023–1025.

Midya, S. K.; Ghosh, S. N. (1994): Seasonal variations of O I 6300 Å night airglow emission at Calcutta and other stations and its covariation with O I 5577 Å emission. *Earth, Moon, and Planets* **vol. 66**, p. 145–152.

Millman, p. M.; Clifton, K. S. (1975): SEC Vidicon spectra of Geminid meteors, 1972. *Canadian Journal of Physics* **vol. 53**, p. 1939–1947.

Millman, p. M.; Cook, A. F.; Hemenway, C. L. (1971): Spectroscopy of Perseid meteors with an image orthicon. *Canadian Journal of Physics* **vol. 49**, p. 1365–1373.

Molau, S. (1999): The Meteor Detection Software METREC. *Proceedings of the International Meteor Conference, Stará Lesná 20–23 August 1998,* p. 9––16.

Moore, J. G. (1971): Lifetimes and heights of O(^1S) in pulsating auroræ. *Planetary and Space Science* **vol. 19**, p. 119–124.

Murtagh, D. P.; Witt, G.; Stegman, J.; McDade, I. C.; Llewellyn, E. J.; Harris, F.; Greer, R. G. H. (1990): An assessment of proposed $O(^1S)$ and $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ nightglow excitation parameters. *Planetary and Space Science* **vol. 38**, p. 43–53.

Štork, R.; Koten, P.; Borovička, J.; Spurný (2002): Double station meteors recorded in Ondřejov's programme. *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2002. International Conference, 29 July–2 August 2002, Berlin, Germany, Ed. Barbara Warmbein* 189–192.

Parkinson, T. D.; Zipf, E. C. (1970): Energy transfer from $N_2(A^3\sum_u^+)$ as a source of O(^1S) in the aurora. *Planetary and Space Science* **vol. 18**, p. 895–900.

Richer, M. G.; McCall, M. L.; Martin, P, G. (1991): Neutral oxygen in planetary nebulæ– Probing radiative transfer and nebular structure. *Astrophysical Journal* **vol. 377**, p. 210–226.

Rogers, L. A.; Hill, K. A.; Hawkes, R. L. (2005): Mass loss due to sputtering and thermal processes in meteoroid ablation. *Planetary and Space Science* **vol. 53**, p. 1341–1354.

Saidov, K. H.; Simek, M. (1989): Luminous efficiency coefficient from simultaneous meteor observations. *Bulletin of Astronomical Institutes of Czechoslovakia* **vol. 40**, p. 330–332.

Shapiro, R. (1969): The relationship between variations of solar corpuscular and ultra-violet radiation and the intensity of the mid-latitude airglow in the O I line (λ5577 Å). *Planetary and Space Science* **vol. 17**, p. 1323.

Slanger, T. G.; Huestis, D. L.; Cosby, p. C.; Bida, T. A. (2000): First Observation of the 5577 Å Oxygen Green Line in the Night Airglow of Venus. *Bulletin of the American Astronomical Society* **vol. 32**, p. 1120.

Slipher, V. M. (1919): On the General Auroral Illumination of the Sky and the Wave-Length of the Chief Aurora Line. *Astrophysical Journal* **vol. 49**, p. 266–275.

Southworth, R. B.; Hawkins, G. S. (1963): Statistics of meteor streams. *Smithsonian Contributions to Astrophysics* **vol. 7**, p. 561–585.

Spurný, P., Betlem, H., van't Leven, J., and Jenniskens, J. (2000): Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the 13 brightest photographic Leonids from the ground-based expedition to China. *Meteoritics & Planetary Science* **35**, p. 243–249.

Takahashi, H.; Sahai, Y.; Batista, p. P. (1984): Tidal and solar cycle effects on the O I 5577 Å, NaD and OH(8,3) airglow emissions observed at 23° S. *Planetary and Space Science* **vol. 32**, p. 897–902.

Zhang, H. W.; Zhao, G.; Hu, J. Y. (2001): A catalogue of emission lines in spectra of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Astronomy and Astrophysics* **vol. 367**, p. 1049–1055.

Zinn, J.; Wren, J.; Whitaker, R.; Szymanski, J.; Revelle, D. O.; Priedhorsky, W.; Hills, J.; Gisler, G.; Fletcher, S.; Casperson, D.; Bloch, J.; Balsano, R.; Armstrong, W. T.; Akerlof, C.; Kehoe, R.; McKay, T.; Lee, B.; Kelley, M. C.; Spalding, R. E.; Marshall, S. (1999): Coordinated observations of two large

Leonid meteor fireballs over northern New Mexico, and computer model comparisons. *Meteoritics & Planetary Science* **vol. 34**, p. 1007–1016.

zdroj Wikipedia

URL [1] – http://en.wikipedia.org/wiki/Blazed_grating (dne 3. 12. 2008)
URL [2] – http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson_distribution (dne 12. 8. 2007)
URL [3] – http://en.wikipedia.org/wiki/Video_camera_tube#Image_Orthicon (dne 2. 12. 2008)
URL [4] – http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html (dne 8. 12. 2008)

Dodatok – Použité formáty súborov

ALS

Vstupný formát programu `vyska_intenzity`. Je to CSV súbor s pevnou šírkou. Dáta sú ukladané v blokoch, kde každý blok obsahuje hlavičku a datovú časť. V hlavičke je zaznamenané číslo spektra, poradové číslo snímky a interval výšky meteoru na snímke. V nasledujúcom riadku je zaznamenaná vlnová dĺžka skenovanej čiary a spektrálny rád. Ďalší riadok je prvý riadok dátovej časti.
V dátovej časti je každý riadok obsahovo identický a obsahuje: strednú výšku zelenej čiary, normovanú intenzitu v danej výške, medián normovanej intenzity prvých siedmych snímiek, vdialenosť meteoru a skutočnú dĺžku stopy meteoru, ktorú skenujeme.

MIM

V súbore MIM sú uložené výsledky redukcie dvojstaničných pozorovaní. Pre každú stanicu je určený samostatný set dát. Z podstatných vecí obsahuje hodnotu K_B, profil magnitúdy meteoru s výškou, fotometrickú hmotnosť $\mu_{\text{phot.}}$, začiatočnú a konečnú výšku meteoru a jeho rýchlosť.

RSP

Súbor obsahuje výsledok redukcie polohy meteoru zo spektrálnej kamery. Z podstatných vecí obsahuje parametre astrometrickej redukcie, parametre fotometrickej redukcie ($m_{\text{phot.}}$) a polohu radiantu meteoru.

Nasledujú výstupné súbory programu `vyska_intenzity`

CNT – intensity of continuum of meteor

Súbor obsahuje výrez kontinua meteoru v zelenej čiare v okamihu, keď sa na snímke v danej výške nachádza meteor.
Každý riadok obsahuje tri čísla. Výšku a množstvo žiarenia vyžiarené meteorickým telieskom (meteor body) v kontinuu v okolí čiary 557,7 nm – merané dvoma spôsobmi. Prvý spôsob (CNT) hovorí, že ak sa meteor vyskytne v našom bine, tak sa intenzita binu započíta celá. Druhý spôsob (CNT_OUT) nám započíta len pomernú časť celej intenzity (v pomere v akom je dĺžka meteoru v snímku voči šírke binu). Šírka štrbiny je rovnaká, ako je použitá pri výpočte integrálnej intenzíty zelenej čiary – cieľom je, aby sa tieto dve čísla dali jednoducho odčítať.
Problém nastáva, keď je krok vo výške malý v porovnaní s dĺžkou, ktorú prejde meteor na jednej snímke. V tom okamihu je možné, že v danej výške sa meteor nenachádza, alebo naopak nachádza, aj keď tam nie je, Je to dané chybou zaokrúhlenia vo vstupných dátach (ALS súbor).

NC – not corrected intensity

Nekorigované súčty ADU pre danú výšku. Vďaka neredukcii pozadia má pozadie tvar hyperboly.

INT

Súbor obsahuje tri stĺpce: výška, intenzita od snímky 1 vrátane a intenzita od snímky 2 vrátane.

Integrálna intenzita zelenej čiary v danej výške na všetkých snímkoch. Je počítaná ako integrálny súčet snímiek, kde sa nachádza stopa až po prelete meteoru. Prvý súčet sa počíta od prvej snímky po prelete (kde ešte môže byť nejaká časť meteoru), druhý od druhej snímky (kde už ale strácame časť intenzity zelenej čiary). U slabších meteorov je problém, že časť dosvitu je odrezaná v čase – operátor prezerajúci a digitalizujúci TV analógový záznam odstrihol tú časť spektra, kde nie je zelená čiara vidieť voľným okom, ale kde je spoľahlivo detekovateľná v integrálnych súčtoch (viď graf 68).

OUT

Integrálny súčet intenzít cez všetky snímky vo všetkých výškach. Nie je odčítané kontinuum meteoru. Jeho praktický význam spočíva v tom, že vieme lepšie orezať chybne hodnoty.

RES

Podobný výstup ako ALS, avšak k dispozícii je namiesto dvojice (intenzita, intenzita pozadia) dvojica (skutočná intenzita, intenzita pozadia). Je to výber riadkov z ALS súboru, nahradenie mediánu aritmetickým priemerom a normovanie intenzity na štandardnú absolútnu vzdialenosť 100 kilometrov. Ďalšie výpočty používajú tento súbor namiesto ALS.

MED

Súbor, v ktorom sa nachádza súčet intenzít prvých 7 snímiek MEDIAN() a AVERAGE() pre každú výšku.

12I.DAT

Súbor, v ktorom je na každom riadku uložená integrálna hodnota intenzity zelenej čiary od 1. a od 2. snímky. Taktiež je uložený pomer týchto intenzít. Ak je pomer blízky 1, potom je výsledok v poriadku. Nemusí byť nutne menší ako 1, ale v tom prípade je lepšie skontrolovať iné výsledky, či nenastal problém v redukcii.

CIR.dat

Súbor, v ktorom je na každom riadku uložená hodnota intenzity meteoru (CNT, OUT) a intenzity zelenej čiary (INT_frame1+). Pomery CNT/INT a CNT/OUT určujú, nakoľko by sa meteor podieľal na intenzite celej čiary. Čím vyššie číslo, tým väčšie chyby môžu byť pri redukcii zelenej čiary pri odstraňovaní pozadia meteoru.

F7L.DAT

Súbor, v ktorom je na každom riadku uložená integrálna intenzita MEDIAN() a AVERAGE(). Pomer AVERAGE()/MEDIAN() musí byť blízko 1, resp. musí byť blízko čísla 1+1/3*1/stredna_hodnota_sumu (viď rovnica (17)). Ak nie je, je nieco v redukcii zle.

ULR.DAT

Súbor, v ktorom je na každom riadku uložená hodnota intenzity kontinua meteoru, a to horná (CNT_OUT) a spodná hodnota (CNT). Následuje ich pomer. Je to pomer intenzít kontinua meteoru.