

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Lukáš Shrbený

Rozložení meteorických těles ve sluneční soustavě z přesných
fotografických záznamů bolidů

AÚ AVČR

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Pavel Spurný, CSc.

Studijní program: fyzika, astronomie a astrofyzika

Poděkování

Rád bych na tomto místě využil možnosti poděkovat všem, kteří jakoukoli měrou přispěli k tomu, že jsem si mohl vybrat toto téma a dokázal ho uskutečnit.

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

V Praze dne

Lukáš Shrbený

Obsah

Abstrakt	1
Předmluva	3
I Teorie	4
1 Úvod	5
1.1 Meteory	5
1.2 Meteoroidy	6
1.2.1 Populace meteoroidů	6
1.2.2 Souvislost s bolidy	7
2 Zpracování snímků	8
2.1 Astrometrie	8
2.2 Přepočet a , z na α , δ a radiant	10
2.3 Projekce měřených bodů na střední trajektorii	12
2.4 Časové značky na obrazu meteoru	14
2.5 Elementy dráhy	14
2.6 Fotometrie	19
2.7 Temná dráha a místo dopadu	20
3 Radiometrická měření	24
3.1 Kalibrace radiometru	24
II Zpracování	26
4 Měření a výpočty	27
4.1 Skener Microtek	27
4.2 Bolidy EN040904A a EN220495A	28

5	Statistika základních elementů	36
5.1	Četnost typů bolidů	36
5.2	Dráhové elementy	37
5.3	Výjimečné případy	43

	Literatura	45
--	-------------------	-----------

Název práce: Rozložení meteorických těles ve sluneční soustavě z přesných fotografických záznamů bolidů

Autor: Lukáš Shrbený

Katedra (ústav): AÚ AVČR

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Pavel Spurný, CSc.

e-mail vedoucího: spurny@asu.cas.cz

Abstrakt:

Tato práce obsahuje obecný úvod do terminologie a základního dělení meteorů a ze své teoretické části dále popis zpracování fotografických snímků bolidů zachycených pomocí celooblohových kamer a následné určení heliocentrické dráhy meteoroidu, atmosférické dráhy meteoru a místa dopadu meteoritu společně s určením temné dráhy. Součástí teorie je i zmínka o radiometru, jeho kalibraci a použití pro popis meteorů v lepším časovém rozlišení než dávají klasické snímky.

Skutečným výsledkem je jednak hodnocení nového postupu proměřování celooblohových snímků, dále pak statistické zpracování 260 bolidů zachycených převážně Českou bolidovou sítí. Nový postup proměřování celooblohových snímků probíhá tak, vze se proměřují naskenované negativy pomocí programu Fishscan. Tato práce obsahuje i hodnocení používaného skeneru. Statistické zpracování obsahuje přehled četností pádů jednotlivých typů bolidů společně s četností jejich hmotností před a po meteoru, rozložení vypočtených hodnot jejich základních dráhových elementů jako hlavní poloosa, afelová vzdálenost, excentricita a sklon dráhy, dále jsou zde vypsány všechny bolidy od založení České bolidové sítě, jejichž počáteční hmotnost převyšuje 1000 kg a dále ty, jejichž koncová hmotnost je alespoň 1 kg, tedy kdy s velkou pravděpodobností došlo k pádu meteoritu. Na závěr jsou uvedeny výjimečné bolidy, tedy ty, lišící se od obvyklých a častých případů ať už charakterem heliocentrické dráhy nebo svým chováním v zemské atmosféře.

Klíčová slova: meteor, bolid, redukce, radiometr

Title: Distribution of meteoric bodies in the solar system based on exact photographic records of fireballs

Author: Lukáš Shrbený

Department: AÚ AVČR

Supervisor: RNDr. Pavel Spurný, CSc.

Supervisor's e-mail address: spurny@asu.cas.cz

Abstract:

This work contains general introduction into terminology and types of meteors and fireballs. Next theoretical part contains description of reductions of all-sky photographic images and subsequent determination of meteoroid heliocentric orbit, atmospheric trajectory and impact point of meteorite through the calculation of its dark flight. As a part of theory, the radiometer and its calibration

and use is described. This instrument is important for determination of light curves of fireballs with much better time resolution than photographic images can give.

Main results of this work consist in the comparison of direct measurements of all-sky images by Ascorekord measuring device and the scanned images using the new Fishscan software and then statistical analysis of 260 photographic fireballs recorded mostly by the Czech Fireball Network. This work also contains analysis of suitability of the used scanner. Statistical analysis contains rate of individual fireball types along with numbers of their masses before and after fireball event, distribution of measured values of their main orbital elements like semimajor axes, aphelion distances, eccentricities and inclinations. There are presented also all biggest EN fireballs with initial masses over 1000 kg as well as the fireballs with significant (more than 1 kg) terminal masses, which imply high probability of meteorite fall. Finally, exceptional fireballs that differ from usual and frequent cases mostly due to type of their heliocentric orbit or by their behaviour in the Earth's atmosphere are discussed.

Keywords: meteor, fireball, reduction, radiometer

Předmluva

Ačkoli úvodní část by měla nebo mohla obsahovat něco tematicky blízkého k vlastnímu tématu práce, splním to pouze okrajově.

Během vypracovávání této diplomové práce jsem si uvědomil, že terminologie v oblasti meteorů je chudá na slova českého původu. Jistě, pro meteor máme hned dva výrazy - povětroň a létavice. To je ale vše. Přidržel jsem se tedy vzoru termínů cizího původu a tím jsem jednoduše vytvořil čtyři české novotvary. Jsou to létavicoid a povětroňoid pro meteoroid respektive létavicit a povětronit pro meteorit. Je možné, že to již někoho napadlo, ale já o tom nic neslyšel, a proto to 13.3.2005 napadlo mě.

I když létavicit zní jako chemická sloučenina a povětroňoid velmi krkolomně, tak alespoň slova povětronit a hlavně létavicoid znějí příjemně a možná i tak trochu mile, a to je to, co bych rád měl u všech termínů, nejen v oboru astronomie. Přestávám ale filozofovat a nadále se budu věnovat vlastní diplomové práci.

Část I
Teorie

Kapitola 1

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá bolidy a minulostí a vlastnostmi vesmírných těles, která je způsobují. Cílem práce je určit rozložení těchto těles ve sluneční soustavě, a to z přesných fotografických záznamů bolidů zachycených celoblohovými kamerami převážně z české části (obrázek 1.1) Evropské bolidové sítě (EN).

Dílčím cílem práce bylo mé seznámení se s měřením snímků, které se v průběhu práce ukázalo jako zajímavé, a to díky porovnání klasického měření Ascokordem s měřením skenovaných snímků programem Fishscan.

Ke splnění cíle diplomové práce byla použita data o EN bolidech z posledních třech desetiletích, která byla již dříve zpracována, a které jsem jako jeden z dílčích úkolů doplnil do elektronické databáze bolidů, jež byla v minulých letech vytvořena na pracovišti vedoucího diplomové práce. Z této databáze jsem vybral a roztrídil heliocentrické dráhy bolidů do jednotlivých skupin podle významných dráhových charakteristik.

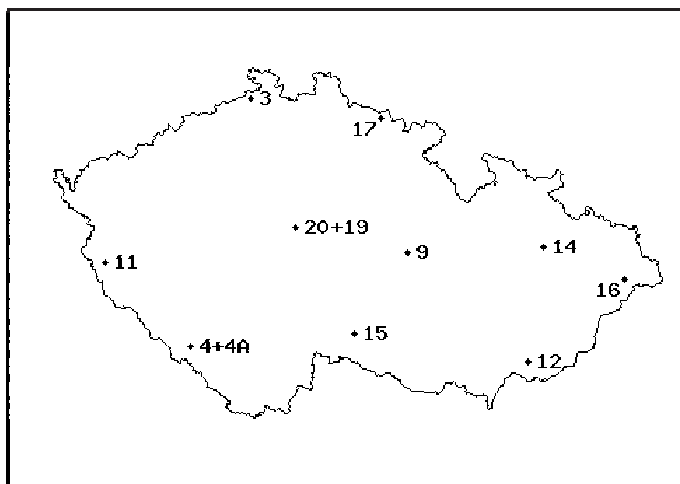
1.1 Meteory

V tomto obecném úvodu budou uvažována tělesa, nebude-li řečeno jinak, jejichž rychlost v zemské atmosféře je 15 km/s , hustota 3500 kg/m^3 a mající radiant v zenitu.

Meteorem se rozumí světelný úkaz způsobený průletem tělesa zemskou atmosférou, které má potřebné vlastnosti, jako rozměr, velikost, hustota či sklon letu k povrchu Země, aby bylo ještě schopné vyvolat detekovatelné záření. Při zahřátí povrchu tělesa na zhruba 2200 K se z něj začnou odpařovat do okolí horké páry s excitovanými atomy, které při následné postupné deexcitaci září. Záření meteorů většinou obsahuje emisní spektrální čáry kovů a železa.

Meteor nulté hvězdné velikosti je způsoben buď tělesem o velikosti 2 cm s rychlostí 15 km/s nebo 1 cm objektem s rychlostí 30 km/s a nebo $0,5 \text{ cm}$ tělesem o rychlosti 60 km/s , přičemž má ve všech třech případech radiant v zenitu. V této práci se často mluví o bolidech, což jsou velmi jasné meteory o jasnosti -4 mag nebo jasnější. Při rychlosti 3 km/s již není dostatek kinetické

Obrázek 1.1: Rozložení stanic bolidové sítě na území ČR



3	Růžová	11	Přimda	16	Lysá hora
4	Churáňov	12	Veselí nad Moravou	17	Pec pod Sněžkou
4A	Churáňov-pointovaná	14	Červená hora	19	Ondřejov-pointovaná
9	Svratouch	15	Telč	20	Ondřejov

energie k udržení teploty povrchu nad 2200 K, těleso se dále brzdí a chladne, čímž povrchová natátá vrstva vytvoří několik desetin milimetru silnou tmavou krustu typickou pro meteority nalezené na povrchu Země. Zbytek tělesa pak padá k zemi volným pádem a dále samo nezáří, nastává tzv. temná dráha.

1.2 Meteoroidy

Meteoroidem je označováno každé těleso jak v meziplanetárním prostoru tak v atmosféře Země, jehož maximální velikost (chápáno jako průměr koule, která nejlépe těleso aproximuje) je řádově 10 m. Nejmenší meteoroidy schopné vyvolat zaznamenanatelný meteor jsou velké 0,01 mm. Tato velikost je samozřejmě závislá na rychlosti a hustotě meteoroidu, proto je velikost 0,01 mm jen hrubá hodnota beroucí v úvahu rychlostní spektrum těles pohybujících se v blízkosti Země po heliocentrických drahách.

1.2.1 Populace meteoroidů

Různé druhy meteoroidů v závislosti na rozdílných počátečních výškách meteorů byly poprvé rozpoznány v roce 1958. Mezi všemi typy meteoroidů byly rozpoznány dvě hladiny počáteční výšky vzdálené od sebe 10 km. Spodní byla označena A, horní C. Meteoroidy skupiny C obsahují dva druhy oběžných drah. První je C1, který má krátkoperiodické dráhy blízko roviny ekliptiky

Tabulka 1.1: Rozdělení typů meteorů podle hodnoty PE

Typ	Hodnota PE
I	$-4,60 < PE$
II	$-5,25 < PE \leq -4,60$
IIIA	$-5,70 < PE \leq -5,25$
IIIB	$PE \leq -5,70$

a druhý je C2, jež obsahuje orbity s dlouhou periodou a náhodným sklonem k ekliptice. Meteoroidy příslušející meteorickým rojům se známou mateřskou kometou jsou buď typu C1 nebo C2, čímž je kometární původ těles skupiny C zcela přesvědčivý. Během 60. let 20. století byly navíc rozpoznány další dvě skupiny meteoroidů, přechodná skupina B, nacházející se mezi A a C s typickými heliocentrickými drahami s malou perihelovou vzdáleností a s afelem v blízkosti Jupitera a skupina D odpovídající nejvyšším známým výškám začátků meteorů a meteoroidům roje Drakonid s nejnižší objemovou hustotou mezi všemi typy pevných kometárních materiálů přicházejících na Zemi [1].

1.2.2 Souvislost s bolidy

Analogií ke skupinám meteoroidů jsou typy bolidů dle schopnosti ablace. Typ I má nejnižší schopnost ablovat, největší objemovou hustotu a případné meteority patří k obyčejným chondritům asteroidálního původu, typ II má o něco větší schopnost ablovat, nižší hustoty a předpokládá se, že meteority jsou uhlíkaté chondrity. Typ II může být jak asteroidálního tak kometárního původu. Typ IIIA obsahuje tělesa s velkou ablací a hustotou nižší než voda. Existují zde jako u skupiny C dva typy drah, C1 a C2 značená zde jako IIIAi a navíc skupina C3, která obsahuje tělesa na krátkoperiodických drahách, ale s náhodným sklonem. Skupina C3 nemá mezi bolidy zastoupení ani 5%, ale je nejpočetnější skupinou mezi meteoroidy lehčími než 10^{-6} kg. Typ IIIB obsahuje tělesa s nejvyšším známým ablačním koeficientem a nejnižší hustotou, typickým zástupcem jsou Drakonidy. Bolidy typů IIIA, IIIAi, C3 a IIIB jsou kometárního původu. V dnešní době se pro určení typu meteoru používá PE kritéria [7].

$$PE = \log \rho_E + A \log m_\infty + B \log v_\infty + C \log(\cos z_R), \quad (1.1)$$

kde konstanty A, B a C nabývají hodnot $A = -0,42 \pm 0,05$, $B = 1,49 \pm 0,31$ a $C = -1,29 \pm 0,20$. Rozdělení typů podle hodnoty PE je uvedeno v tabulce 1.1.

Kapitola 2

Zpracování snímků

K určení geometrie, dynamiky a fotometrie bolidů slouží celooblohové snímky z fotografické bolidové sítě. Jednotlivé stanice jsou vybaveny kamerami s objektivy typu rybí oko (Zeiss Distagon 3.5/30mm). Fotografování probíhá dvěma možnými způsoby, buď je kamera nastavena pevně nebo sleduje denní pohyb hvězd. Pro druhý způsob pořizování snímků se používá označení pointovaná kamera. Ke stanovení všech charakteristik meteoroidu, tedy drah jak ve sluneční soustavě tak v zemské atmosféře, jsou zapotřebí snímky alespoň ze dvou různých stanic.

2.1 Astrometrie

Každý snímek oblohy musí kromě stopy meteoru obsahovat dostatečné množství hvězd, jakožto známých srovnávacích bodů. Na každé fotografické desce se zavádí pravoúhlé souřadnice x a y , úhlová vzdálenost u od středu projekce v rozsahu 0° až 90° , azimut projekce b od 0° do 180° , kde nulový bod b je definován tak, že pro zenit je $b = 180^\circ$. Osa x je orientována k jihu, osa y k západu (Obrázek 2.1). Pokud střed projekce je totožný se zenitem, pak u odpovídá zenitové vzdálenosti z a b astronomickému azimutu a . Ve skutečnosti si ale oba body neodpovídají a střed projekce leží v místě s malou zenitovou vzdáleností ε a azimutem E . Vztah mezi astronomickými souřadnicemi a souřadnicemi na snímku uvádějí následující vzorce.

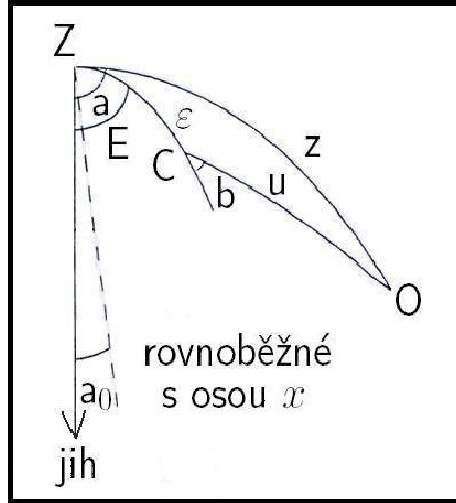
$$\cos z = \cos u \cos \varepsilon - \sin u \sin \varepsilon \cos b \quad (2.1)$$

$$\sin(a - E) = \sin b \sin u / \sin z \quad (2.2)$$

$$b = a_0 - E + \arctan\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right). \quad (2.3)$$

Bod o souřadnicích x_0 a y_0 je střed projekce v systému os x , y a a_0 je úhel mezi x a jihem. Úhlovou vzdálenost u je možno vyjádřit jako funkci vzdálenosti od bodu $[x_0, y_0]$. Pokud by zobrazení bylo ideální, tedy bylo osově symetrické vůči optické ose objektivu a fotografická deska by byla identická s ohniskovou

Obrázek 2.1: Souřadnice na snímku



rovinou, pak vzdálenost r_0 od počátku deskových souřadnic je

$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (2.4)$$

Zobrazení je ale ve skutečnosti eliptické, což má za následek, že v různých směrech od středu projekce se mění měřítko. Vzdálenost r je tedy závislá na úhlu mezi osou x a osou elipsy, tedy významným směrem eliptického zobrazení. Tento úhel označíme α .

$$r = r_0[1 + A \sin(\alpha - F)] \quad (2.5)$$

$$\alpha = a_0 + \arctan\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right). \quad (2.6)$$

Konstanty A a F jsou další neznámé, které je třeba společně s ε , E , x_0 , y_0 a a_0 během redukce snímku určit. Úhlová vzdálenost u je tedy funkcí r , ve které vystupují další neznámé konstanty V , S , D , P , Q [3, 6].

$$u = Vr + S(e^{Dr} - 1) + P(e^{Qr^2}). \quad (2.7)$$

Použitím součtového vzorce na funkci $\sin(\alpha - F)$ a užitím vztahů (2.4) a (2.6) vyloučíme z (2.5) úhel α .

$$r = C \left[\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + A(y - y_0) \cos(F - a_0) - A(x - x_0) \sin(F - a_0) \right]. \quad (2.8)$$

Tabulka 2.1: Standardní konstanty objektivu typu rybí oko

fotodeska	N_*	u_{max}	σ	V	S	D	$P \cdot 10^6$	Q
20A - 1803	64	90°,6	0°,0150	0,031656 ±41	0,00677 33	0,0953 12	2,20 77	0,00638 20

C je poslední neznámou konstantou, která reprezentuje celkový škálový faktor.

Podle fyzikálního významu lze redukční konstanty rozdělit do čtyř skupin. *Konstanty fotografické desky* - x_0 , y_0 a a_0 . Definují posun a otočení pravoúhlých souřadnic x a y . *Konstanty kamery* - A , F , C . Definují pozici na fotodesce vůči optické ose. A a F reprezentují sklon desky vůči ohniskové rovině a C vyjadřuje posun desky podél optické osy, přičemž $C = 1$ pokud střed projekce leží v ohnisku kamery. *Konstanty čoček objektivu* - V , S , D , P , Q . Definují projekci pomocí objektivu v závislosti na vzdálenosti od optické osy. Tyto konstanty v sobě zahrnují i vliv astronomické refrakce. *Konstanty pozorovací stanice* - ε a E . Definují odchylku optické osy kamery od zenitu.

Ze třinácti konstant je jich jen dvanáct nezávislých, ty jsou určeny pomocí metody nejmenších čtverců a současnou minimalizací reziduí v zenitové vzdálenosti $|z - z_{cat}|$ a azimutu $|a - a_{cat}| \sin(z_{cat})$. Index 'cat' znamená katalogové hodnoty z a a . Pokud je na fotografické desce jen málo hvězd, celý postup je podobný, jen se některé redukční konstanty položí za pevné. Například P a Q nebo všechny čočkové konstanty jsou fixovány a $C \neq 1$. Hodnoty zvolené jako standardní čočkové konstanty jsou definovány pomocí ondřejovské fotodesky 20A - 1803 (Tabulka 2.1). Při použití těchto konstant nepřesahuje standardní odchylka určení polohy hvězdy hodnotu 0°,015. Pro tento postup je nutná přítomnost zhruba patnácti srovnávacích hvězd na fotodesce, jinak je postup nespolehlivý.

2.2 Přepočítání a , z na α , δ a radiant

K přepočtu a , z na α , δ je zapotřebí znát místní čas pozorovací stanice v okamžiku bolidu a její zeměpisné souřadnice φ , λ . Tím známe libovolné α , δ a geocentrickou polohu stanice. K přepočtu φ na geocentrickou šířku φ' slouží

$$\varphi' = \varphi - 0,1924240867^\circ \sin 2\varphi + 0,000323122^\circ \sin 4\varphi - 0,0000007235^\circ \sin 6\varphi. \quad (2.9)$$

Hodnota geocentrického radius vektoru k nulové nadmořské výšce je

$$R = \left(4068669,86 \frac{1 - 0,0133439554 \sin^2 \varphi}{1 - 0,006694385096 \sin^2 \varphi} \right)^{1/2}. \quad (2.10)$$

Zavádí se pravoúhlé geocentrické souřadnice

$$\begin{aligned} X &= (R + h) \cos \varphi' \cos \vartheta \\ Y &= (R + h) \cos \varphi' \sin \vartheta \\ Z &= (R + h) \sin \varphi', \end{aligned} \quad (2.11)$$

kde h je výška stanice nad mořem. Jednotkový vektor (ξ, η, ζ) do směru α, δ je v tomto souřadném systému tedy

$$\begin{aligned} \xi &= \cos \delta \cos \alpha \\ \eta &= \cos \delta \sin \alpha \\ \zeta &= \sin \delta. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Podél celé dráhy se určí a proměří dostatek bodů, čímž vzniknou vektory (ξ_i, η_i, ζ_i) , $i = 1, 2 \dots k$, kde k je celkový počet měřených bodů na stopě bolidu. Tyto vektory tvoří rovinu procházející stanicí i střední trajektorii. Pokud (a, b, c) je jednotkový vektor kolmý na tuto rovinu, pak

$$a\xi_i + b\eta_i + c\zeta_i = \Delta_i, \quad (2.13)$$

kde $\Delta_i = 0$ v ideálním případě, když (a, b, c) je kolmý ke všem (ξ_i, η_i, ζ_i) . Ve skutečnosti jsou Δ_i malé hodnoty, které je třeba minimalizovat výběrem neznámého jednotkového vektoru (a, b, c) . Klademe podmínku

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \text{minimum}, \quad (2.14)$$

která dává řešení

$$\begin{aligned} a' &= \sum \xi_i \eta_i \sum \eta_i \zeta_i - \sum \eta_i^2 \sum \xi_i \zeta_i \\ b' &= \sum \xi_i \eta_i \sum \xi_i \zeta_i - \sum \xi_i^2 \sum \eta_i \zeta_i \\ c' &= \sum \xi_i^2 \sum \eta_i^2 - \sum \xi_i \eta_i \sum \xi_i \eta_i \\ d' &= \sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2} \\ a &= a'/d' \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} b &= b'/d' \\ c &= c'/d'. \end{aligned}$$

Rovina procházející stanicí a trajektorií, rovina stanice - dráha (rovina Φ), je

$$a\xi + b\eta + c\zeta + d = 0, \quad (2.16)$$

kde $-d = aX_A + bY_A + cZ_A$ je vzdálenost roviny Φ a středu Země. $[X_A, Y_A, Z_A]$ je pozice stanice A v geocentrickém systému (2.11). Bolid je zachycen alespoň ze dvou stanic, máme tedy několik párů rovin Φ .

Mějme stanice A a B, pro každou máme rovinu podle (2.16), jejich průsečík je tedy hledaná trajektorie. Jednotkový vektor průsečíku je tedy i vektor shodný s dráhou meteoru. Jeho složky jsou

$$\begin{aligned} \xi_r &= (b_{ACB} - b_{BCA})/d \\ \eta_r &= (a_{BCA} - a_{ACB})/d \\ \zeta_r &= (a_A b_B - a_B b_A)/d, \end{aligned} \quad (2.17)$$

kde

$$d = \left[(b_{ACB} - b_{BCA})^2 + (a_{BCA} - a_{ACB})^2 + (a_A b_B - a_B b_A)^2 \right]^{1/2}. \quad (2.18)$$

Použitím (2.12) snadno určíme radiant (α_R, δ_R) . Důležitým údajem pro určení statistické váhy průsečíku je úhel Q_{AB} mezi oběma rovinami, tedy úhel mezi (a_A, b_A, c_A) a (a_B, b_B, c_B) . Váha průsečíku je úměrná $\sin^2 Q_{AB}$.

$$\cos Q_{AB} = \frac{a_A a_B + b_A b_B + c_A c_B}{\sqrt{(a_A^2 + b_A^2 + c_A^2)(a_B^2 + b_B^2 + c_B^2)}}. \quad (2.19)$$

2.3 Projekce měřených bodů na střední trajektorii

Body definující dráhu meteoru nemusejí všechny ležet v rovině Φ , ani na střední dráze, která je dána průsečíkem rovin ze dvou stanic. Následující postup je kolmá projekce měřených bodů stanice A na střední trajektorii.

Mějme nějaký měřený bod n , pro něj (ξ_n, η_n, ζ_n) a pozici příslušné stanice $[X_A, Y_A, Z_A]$. To definuje přímku, která se jen trochu odklání od roviny Φ . Zavedeme rovinu kolmou na rovinu Φ , která obsahuje přímku $[X_A, Y_A, Z_A]$, (ξ_n, η_n, ζ_n) . Průsečík této roviny a střední trajektorie je bod, který hledáme,

nejbližší bod od měřeného místa ležící na střední dráze. Rovina kolmá na rovinu Φ se dá zapsat jako

$$a_n\xi + b_n\eta + c_n\zeta + d_n = 0. \quad (2.20)$$

Vektor (a_n, b_n, c_n) a d_n jsou

$$\begin{aligned} a_n &= \eta_n c_A - \zeta_n b_A \\ b_n &= \zeta_n a_A - \xi_n c_A \\ c_n &= \xi_n b_A - \eta_n a_A \\ d_n &= -(a_n X_A + b_n Y_A + c_n Z_A). \end{aligned} \quad (2.21)$$

Hledaný bod $[X_n, Y_n, Z_n]$ je průsečík následujících tří rovin.

$$\begin{aligned} a_A\xi + b_A\eta + c_A\zeta + d_A &= 0 \\ a_B\xi + b_B\eta + c_B\zeta + d_B &= 0 \\ a_n\xi + b_n\eta + c_n\zeta + d_n &= 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Můžeme tak určit vzdálenost r_n tohoto bodu od stanice A

$$r_n = [(X_n - X_A)^2 + (Y_n - Y_A)^2 + (Z_n - Z_A)^2]^{1/2}. \quad (2.23)$$

Opravený vektor (ξ_n, η_n, ζ_n) na $(\xi'_n, \eta'_n, \zeta'_n)$ je tedy průsečík dvou rovin, jejichž normálové vektory jsou (a_A, b_A, c_A) a (a_n, b_n, c_n) .

Projekce bodu $[X_n, Y_n, Z_n]$ na povrch Země pomocí (2.11) dává geocentrickou šířku φ'_n , která se pomocí (2.9) převede na geografickou šířku φ_{nc} . Zbývá poslední korekce, a to oprava φ_{nc} na skutečnou šířku φ_n . Odlišnost těchto dvou hodnot je způsobena tím, že projekce bodu $[X_n, Y_n, Z_n]$ pomocí (2.11) je radiální a ne vertikální.

$$\varphi_n = \varphi_{nc} + h_n \frac{(\varphi'_n - \varphi_{nc})}{(R + h_n)} \quad (2.24)$$

Použitím rovnic (2.20) - (2.24) pro 2 stanice dostáváme h_n, r_n, φ_n a λ_n podél celé dráhy meteoru. Můžeme tedy určit vzdálenosti l_i podél trajektorie a nahlížet na ně jako na funkce času, pak lze určit i průběh rychlosti a brzdění během letu meteoru.

2.4 Časové značky na obrazu meteoru

Pro určení časového průběhu meteoru se používá časových značek, které jsou vytvořeny pomocí rotujícího sektoru přímo na obrazu stopy meteoru na fotografickém snímku. V případě celooblohových kamer je rotující sektor umístěn velmi blízko ohniskové roviny objektivu. Pokud u_b je počet zákrytů fodesky rotujícím sektorem za 1 sekundu, pak $1/u_b$ je počet časových značek, tedy přerušovaných úseků na obrazu meteoru, za 1 sekundu. Protože dochází ke složení postupného pohybu rotujících ramen a obrazu meteoru, je třeba tento efekt započítat při určení relativního času t_n , času n -té značky. Začátek počítání relativního času určíme jako první počítanou časovou značku ($t = 0$ pro $l = l_1$).

$$t_n = \frac{1}{f} \left(l_n - l_1 + \frac{n_{SR} \Delta\varphi_n}{2\pi} \right), \quad (2.25)$$

kde n_{SR} je počet ramen rotujícího sektoru, f je počet otočení sektoru za 1 sekundu a $\Delta\varphi_n$ je úhel mezi pozicí sektoru při prvním a n -tém zakrytí obrazu stopy meteoru, tedy mezi první a n -tou časovou značkou.

$$\Delta\varphi_n = \arctan \left(\frac{(x_1 - x_c)}{(y_1 - y_c)} \right) - \arctan \left(\frac{(x_n - x_c)}{(y_n - y_c)} \right), \quad (2.26)$$

kde $[x_c, y_c]$ jsou pravouhlé souřadnice osy rotujícího sektoru, $[x_1, y_1]$ a $[x_n, y_n]$ jsou souřadnice první respektive n -té časové značky.

Nyní máme pro každé l_n a h_n i příslušný čas t_n , můžeme je tedy pomocí různých metod fitovat jako funkce času. Výběr metody závisí na číselné odlehlosti jednotlivých l_n , které určují použití různých předpisů pro interpolaci. Existuje jeden z parametrů, které ovlivňují hladkost fitu l_n jako funkci t_n , který je zásadní pro určení dráhy meteoroidu ve sluneční soustavě. Jedná se o počáteční rychlost meteoroidu v_∞ (rychlost mimo atmosféru).

2.5 Elementy dráhy

Počáteční rychlost v_∞ a radiant $(\bar{\alpha}_R, \bar{\delta}_R)$, střední hodnoty znamenají, že radiant je určen z měření všech N fotografií, kde byl bolid zachycen ($N \geq 2$), definují vektor počáteční rychlosti, ze kterého vycházíme. Začínáme počítat se středními pozorovanými hodnotami v_∞ , \bar{v} a $(\bar{\alpha}_R, \bar{\delta}_R)$. \bar{v} je střední rychlost braná někde poblíž prostředku střední dráhy meteoru. Její směr se bere jako u v_∞ . Důležitým parametrem pro výpočet heliocentrické dráhy je čas průletu meteoru, který definuje uzel dráhy.

Nejdříve opravíme pozorovaný vektor rychlosti \bar{v} o zemskou rotaci. Zemská rotační rychlost v_E je

$$v_E = \frac{2\pi (\bar{R}_n + \bar{h}_n) \cos \varphi'_n}{86164,09}, \quad (2.27)$$

kde $(\bar{R}_n + \bar{h}_n)$ je radius vektor k bodu $[\bar{X}_n, \bar{Y}_n, \bar{Z}_n]$, kde se meteoroid pohyboval rychlostí \bar{v} a φ'_n jeho geocentrická šířka. Vektor \bar{v} má složky

$$\begin{aligned} \bar{v}_x &= |\bar{v}| \bar{\xi}_R \\ \bar{v}_y &= |\bar{v}| \bar{\eta}_R \\ \bar{v}_z &= |\bar{v}| \bar{\zeta}_R \end{aligned} \quad (2.28)$$

a opravený vektor $\bar{v}_c = (v_{xc}, v_{yc}, v_{zc})$ má tedy složky

$$\begin{aligned} v_{xc} &= \bar{v}_x - v_E \cos \alpha_E \\ v_{yc} &= \bar{v}_y - v_E \sin \alpha_E \\ v_{zc} &= \bar{v}_z, \end{aligned} \quad (2.29)$$

kde α_E je rektascenze východního bodu odpovídající zeměpisné šíře $\bar{\varphi}_n$ a délce $\bar{\lambda}_n$ středního bodu $[\bar{X}_n, \bar{Y}_n, \bar{Z}_n]$.

Druhým krokem je oprava vektoru \bar{v}_c o zemskou gravitaci. Tato oprava dává vektor geocentrické rychlosti $v_G = (v_{Gx}, v_{Gy}, v_{Gz})$, který má směr vektoru \bar{v}_c . Nejprve opravíme \bar{v}_c o neatmosférickou hodnotu přičtením rozdílu počáteční rychlosti v_∞ a střední rychlosti \bar{v} .

$$v_{\infty c} = \bar{v}_c + v_\infty - \bar{v} \quad (2.30)$$

$v_{\infty c}$ je tedy mimoatmosférická hodnota vektoru \bar{v}_c , velikost geocentrického vektoru rychlosti v_G je tedy

$$v_G = \left(v_{\infty c}^2 - \frac{797201,0}{(\bar{R}_n + \bar{h}_n)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.31)$$

Přepočtením složek (2.29) pomocí (2.12) získáme (α_c, δ_c) -radianť o zemskou rotaci. Můžeme tedy určit příslušnou zenitovou vzdálenost z_c

$$\cos z_c = \sin \delta_c \sin \bar{\varphi}_n + \cos \delta_c \cos \bar{\varphi}_n \cos(\bar{\vartheta}_n - \alpha_c). \quad (2.32)$$

Geocentrická zenitová vzdálenost z_G radiantu je pak

$$z_G = z_c + \Delta z_c, \quad (2.33)$$

kde $\Delta z_c > 0$ splňuje rovnici

$$(v_{\infty c} + v_G) \tan\left(\frac{\Delta z_c}{2}\right) = (v_{\infty c} - v_G) \tan\left(\frac{z_c}{2}\right). \quad (2.34)$$

Geocentrický azimut a_G radiantu je shodný s azimutem a_c radiantu (α_c, δ_c) .

$$a_G = a_c \quad (2.35)$$

Protože jsme k redukci snímku používali zdánlivé polohy hvězd, jsou získané a_G a z_G , tedy geocentrický radiant (α_G, δ_G) , uvedeny ve zdánlivém souřadném systému a je obvyklé je přepočítat na standardní epochu J 2000.0. Přepočítání závisí na precesních a nutačních konstantách a na času uplynulému od nejbližší standardní epochy.

Znalostí v_G a (α_G, δ_G) můžeme vypočítat heliocentrický vektor rychlosti (v_H, L_H, B_H) meteoroidu na jeho dráze v místě střetu se Zemí, kde L a B jsou heliocentrická ekliptikální délka, respektive šířka. Nejprve převedeme zdánlivý radiant (α_G, δ_G) na L_G, B_G pro epochu nejbližšího začátku či středu roku. Heliocentrický ekliptikální systém pravoúhlých souřadnic definujeme

$$\begin{aligned} X &= r \cos L \cos B \\ Y &= r \cos L \sin B \\ Z &= r \sin B, \end{aligned} \quad (2.36)$$

kde r je vzdálenost od Slunce. Pozice Země v tomto systému se určí ze sluneční délky L_{SUN} minus 180° a zemského průvodiče r . Vektor rychlosti Země ve dráze kolem Slunce se spočte z časové změny sluneční délky L_{SUN} a průvodiče r . Pokud V_{AP} je rychlost Země v jednotkách AU za střední sluneční den směrem k zemskému apexu a t je čas ve středních slunečních dnech, pak

$$V_{AP} = \left[\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \left(r \frac{dL_{SUN}}{dt} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.37)$$

Směr V_{AP} je dán ekliptikální délkou L_{AP} zemského apexu

$$L_{AP} = L_{SUN} - \pi/2 - \left(\frac{dr}{dt} \right) / \left(r \frac{dL_{SUN}}{dt} \right). \quad (2.38)$$

Pravoúhlé souřadnice heliocentrické rychlosti $v_H = (v_{Hx}, v_{Hy}, v_{Hz})$ meteoroidu se získají složením geocentrické rychlosti meteoroidu a pohybu Země kolem Slunce.

$$\begin{aligned}
v_{Hx} &= -v_G \cos L_G \cos B_G + V_{AP} \cos L_{AP} \\
v_{Hy} &= -v_G \sin L_G \cos B_G + V_{AP} \sin L_{AP} \\
v_{Hz} &= -v_G \sin B_G
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Rovnice (2.36) mohou být zapsány také pro rychlosti

$$\begin{aligned}
v_{Hx} &= v_H \cos L_H \cos B_H \\
v_{Hy} &= v_H \sin L_H \cos B_H \\
v_{Hz} &= v_H \sin B_H,
\end{aligned} \tag{2.40}$$

čímž můžeme určit velikost heliocentrické rychlosti v_H a její heliocentrický radiant (L_H, B_H) - známe tedy vektor heliocentrické rychlosti meteoroidu v místě střetu se Zemí. Protože rychlost V_{AP} byla spočtena v jednotkách AU za střední sluneční den a geocentrická rychlost v_G v kilometrech za sekundu, je třeba všechny rychlosti převést na společné jednotky - AU za střední sluneční den.

$$v_G [\text{km/s}] = 1731,456829 v_G [\text{AU/střední sluneční den}] \tag{2.41}$$

Ze znalosti v_H a zákona zachování energie ve dráze můžeme určit hlavní poloosu a dráhy meteoroidu

$$a = \frac{k^2 r}{2k^2 - r v_H^2}, \tag{2.42}$$

kde $k = 0,01720209895$ je Gaussova gravitační konstanta ve vztahném systému AU - střední sluneční den - hmotnost Slunce. Délka výstupného uzlu Ω dráhy meteoroidu závisí na znaménku B_H

$$\begin{aligned}
\text{pro } B_H > 0, & \quad \Omega = L_{SUN} \\
\text{pro } B_H < 0, & \quad \Omega = L_{SUN} - \pi.
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Sklon i dráhy meteoroidu se získá ze zákona zachování momentu hybnosti

$$\begin{aligned}
\cos i \sqrt{p} &= \frac{1}{k} (r v_{Hx} \sin L_{SUN} - r v_{Hy} \cos L_{SUN}) \\
\sin i \sqrt{p} &= -\frac{r v_{Hz} \sin L_{SUN}}{k \sin \Omega} \quad \text{nebo} \\
\sin i \sqrt{p} &= -\frac{r v_{Hz} \cos L_{SUN}}{k \cos \Omega}.
\end{aligned} \tag{2.44}$$

Z rovnic (2.44) též určíme parametr p eliptické dráhy, ze znalosti p a a můžeme tedy určit excentricitu e

$$e = \left(1 - \frac{p}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

a z rovnice kuželosečky i pravou anomálii ν

$$\cos \nu = \frac{1}{e} \left(\frac{p}{r} - 1\right). \quad (2.46)$$

Argument pericentra ω závisí na znaménku B_H

$$\begin{aligned} \text{pro } B_H > 0, \quad \omega &= \pi - \nu \\ \text{pro } B_H < 0, \quad \omega &= -\nu. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Pro případ eliptické dráhy ($a > 0$) můžeme určit vzdálenost pericentra q a apocentra Q z geometrických vztahů

$$\begin{aligned} q &= a(1 - e) \\ Q &= a(1 + e). \end{aligned} \quad (2.48)$$

Pokud bychom určili střední anomálii μ , mohli bychom ze třetího keplerova zákona určit i čas DT uplynulý od posledního průchodu pericentrem

$$DT = \frac{\mu a^{3/2}}{k}. \quad (2.49)$$

Střední anomálii určíme pomocí excentrické anomálie E z keplerovy rovnice

$$\mu = E - e \sin E, \quad (2.50)$$

kde E získáme z jednoho ze vztahů

$$\begin{aligned} \cos E &= \frac{r}{p}(e + \cos \nu) \\ \cos E &= \frac{1}{ae}(a - r). \end{aligned} \quad (2.51)$$

Všechny úhlové dráhové elementy jsou určeny pro nejbližší začátek roku nebo střed roku a je potřeba je převést na hodnoty nějaké standardní epochy za pomocí vztahů a číselných parametrů dostupných v astronomických ročenkách.

2.6 Fotometrie

K určení jasnosti bolidů slouží snímky z celooblohových kamer, na nichž jsou zobrazeny hvězdy či jejich stopy. Různě jasné hvězdy se na snímku zobrazí jako různě velké plošky, kruhy v případě pointovaných kamer a čáry u pevně nastavených kamer. Ze znalosti jasností příslušných hvězd a velikostí jejich obrazů na snímku se vypočte gradační křivka, která vyjadřuje závislost mezi zčernáním desky a jasností daného objektu, tedy mezi tloušťkou obrazu na snímku a jeho magnitudou. Přiřazení hvězdných velikostí k jednotlivým tloušťkám obrazů hvězd dává dobré výsledky jen pro $z < 70^\circ$. Přesnost v tomto případě je 0,2 – 0,5 magnitudy, a to i po započtení efektů, jako jsou u pevně nastavených kamer rychlost otáčení fotodesky vůči hvězdám díky rotaci Země, tedy rychlost tvorby hvězdných stop na desce, atmosférická extinkce, zakrývání obrazů hvězd rotující závěrkou (stopa bolidu zakryta není), zeslabení obrazu se vzdáleností od středu projekce a rychlost tvorby obrazu bolidu na fotodesce. V oblasti do 20° od horizontu je přesnost kolem jedné magnitudy.

Největší problém v určení jasnosti bolidu bývá ten, že stopa meteoru je nejjasnějším objektem na celé desce, a tak je třeba gradační křivku extrapolovat, což někdy dává výsledky se standardní odchylkou překračující jednu magnitudu.

Pro definici gradační křivky se používá katalogových hodnot hvězdných velikostí zobrazených hvězd, které je třeba převést z uváděného mezinárodního pětibarevného UBVRI systému do tzv. panchromatického systému magnitud V_p . Pro používanou emulzi ILFORD FP4 125 platí

$$V_p = V + 0,62(B - V) - 0,52(V - R). \quad (2.52)$$

Zdánlivá panchromatická magnituda V_p je funkcí zenitové vzdálenosti a rychlosti tvorby hvězdných stop na desce díky dennímu pohybu, platí tedy $V_p = V_p(z, v_t)$. Pro ohniskovou vzdálenost 30 mm se používá standardní hodnota $v_t = 0,001$ [mm/s]. Hodnoty V_p z rovnice (2.51) jsou $V_p = V_p(0, v_t)$ a pro nějaké z a v_t je můžeme opravit na dané z a standardní hodnotu v_t

$$V_p(z, 0,001) = V_p(0, v_t) + K \left(\frac{1}{\cos z} - 1 \right) + 2,5 \log \left(\frac{v_t}{0,001} \right), \quad (2.53)$$

kde koeficient K je kombinací extinkčního koeficientu a zeslabení obrazu se vzdáleností od středu projekce. Pro průměrnou noc v Evropě a používané kamery Zeiss Distagon je $K = 0,35$. Použitím V_p z (2.55) a šířek w hvězdných stop získáme gradační křivku použité fotodesky. Změřením šířek stopy meteoru získáme pomocí gradační křivky hodnoty V_p pro libovolný bod bolidu a převedeme je na hodnoty M_p , absolutní panchromatické magnitudy.

$$M_p = V_p(z, 0,001) - K \left(\frac{1}{\cos z} - 1 \right) - 2,5 \log \left(\frac{v_f}{0,001} \right) - 5 \log \left(\frac{r}{100} \right) + 0,75, \quad (2.54)$$

kde z je zenitová vzdálenost daného místa na stopě bolidu, v_f je úhlová rychlost pohybu obrazu meteoru na snímku v mm/s a r je jeho vzdálenost od kamery uvedená v km. Hodnota $0,75^m$ je oprava díky rotující závěrce, která na desce zeslabuje pouze obrazy hvězd, nikoli obraz bolidu.

Data získaná z fotometrie je možné dále srovnat nebo doplnit o údaje z radiometrického pozorování. O tomto postupu blíže ve třetí kapitole.

2.7 Temná dráha a místo dopadu

Pokud meteoroid pronikne dostatečně hluboko do atmosféry a jeho původní rychlost klesne pod mez, kdy se již dále netaví, nastává temná dráha, kde meteoroid už nevydává žádné světlo a pokračuje dále k povrchu Země a jeho rychlost se ustálí na rychlost volného pádu. Počáteční podmínky potřebné k řešení tohoto problému jsou poloha, rychlost a zrychlení v posledním bodě světelné dráhy a směr letu meteoroidu v tomto bodě. Jedna z komplikací je špatná znalost větrného pole, největší komplikace je ale ve tvaru tělesa, které musíme předpokládat symetrické. Pohybové rovnice neablujícího tělesa můžeme tedy napsat jako

$$\begin{aligned} \left(\frac{dv_l}{dh} \right) &= \frac{1}{v_h} [-\Gamma S \rho v (V_l + v_l) - 2\omega (v_x \sin \varphi + v_h \cos \varphi \sin a_R)] \\ \left(\frac{dv_h}{dh} \right) &= \frac{1}{v_h} [-\Gamma S \rho v v_h - g + 2\omega \cos \varphi (v_l \sin a_R + v_x \cos a_R)] \quad (2.55) \\ \left(\frac{dv_x}{dh} \right) &= \frac{1}{v_h} [\Gamma S \rho v (V_x + v_x) + 2\omega (v_l \sin \varphi - v_h \cos \varphi \cos a_R)], \end{aligned}$$

kde rychlost meteoroidu $v = (v_l, v_h, v_x)$ je rozložena do tří kolmých složek. Dvě složky jsou ve vertikální rovině, která obsahuje dráhu meteoroidu, jsou to složky horizontální v_l a vertikální v_h , $v_h = dh/dt$. Třetí složka rychlosti, složka v_x , je v horizontálním směru, kolmá na vertikální rovinu letu. Znaménka těchto složek jsou zvolena tak, že $v_l > 0$ ve směru letu meteoroidu, $v_h > 0$ směrem vzhůru, je tedy vždy záporná a $v_x > 0$ napravo, pokud se díváme ve směru letu. Podobně jsou zavedeny i složky rychlosti větru, složky V_l a V_x , kde $V_l > 0$ proti směru letu a $V_x > 0$ ve směru záporných v_x . V pohybových rovnicích se také vyskytuje koeficient tvaru $S = m/s$ a odporový koeficient Γ . S je poměr hmotnosti m a čelního průřezu s meteoroidu, Γ je funkcí Machova čísla, tedy teploty vzduchu a rychlosti meteoroidu. ρ je hustota vzduchu, φ zeměpisná

šířka, a_R astronomický azimut radiantu a $\omega = 2\pi/86164,09$ je úhlová rychlost rotace Země. Protože Coriolisova síla dává jen malou opravu vzhledem k třetí síle, může být v pohybových rovnicích zanedbána. Jejich řešení se provádí numerickou metodou Runge-Kuta s krokem integrace $dh = 0,01$ km, přičemž v každém kroku se rychlost meteoroidu počítá jako

$$v^2 = v_h^2 + (V_l + v_l)^2 + (V_x + v_x)^2. \quad (2.56)$$

Počáteční hodnoty v_l , v_h a v_x pro numerickou integraci se určí pomocí hodnot v posledním bodě světelné dráhy.

$$\begin{aligned} v_l &= v_T \sin z_R \\ v_h &= -v_T \cos z_R \\ v_x &= 0, \end{aligned} \quad (2.57)$$

kde v_T je rychlost v tomto bodě a z_R zenitová vzdálenost radiantu. Počáteční hodnota ΓS se určí z rovnice brždění brané v posledním bodě světelné dráhy

$$(\Gamma S)_T = -\frac{1}{(\rho v^2)_T} \left(\frac{dv}{dt} \right)_T. \quad (2.58)$$

$(\Gamma S)_T$ v sobě implicitně obsahuje neznámé, jako hmotnost, tvar, hustotu a odporový koeficient meteoroidu. Vzdušné hustoty jsou pro bolidy, které pronikly hluboko do atmosféry, dostupné z meteorologických aeronomických měření, pro výše končící bolidy, mezi 30 – 40km, jsou hodnoty z těchto měření extrapolovány. Z aeronomických dat se též bere směr a rychlost větru, obvykle nejbližší hodnoty v čase a místě, jsou extrapolovány, pokud obě místa neoddelují meteorologické singularity, jako frontální rozhraní. Z aerologických měření můžeme pro každý integrační krok určit absolutní teplotu T , hustotu vzduchu ρ a rychlost zvuku c_s

$$\begin{aligned} T &= T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad [\text{K}] \\ \rho &= 3,483676 \times 10^{-4} P/T \quad [\text{g cm}^{-3}] \\ c_s &= 0,0200468 T^{1/2} \quad [\text{km s}^{-1}], \end{aligned} \quad (2.59)$$

kde P je tlak vzduchu v hektopascalech. Z aerologických měření potřebujeme také směr větru, který je dán geodetickým azimutem a_V , což je směr, odkud vítr vane. Pro severní vítr je $a_V = 0^{\circ}$, pro východní $a_V = 90^{\circ}$. Jelikož astronomický azimut a_R , který určuje směr letu meteoroidu je definován tak, že $a_R = 0^{\circ}$ pro jih a $a_R = 90^{\circ}$ pro západ, jsou složky rychlosti větru

$$\begin{aligned} V_l &= V \cos(a_V - a_R) \\ V_x &= V \sin(a_V - a_R), \end{aligned} \quad (2.60)$$

kde V je velikost rychlosti větru. Pro každý krok můžeme též určit celkovou délku temné dráhy od posledního bodu meteoru. Pokud L je složka ve směru letu a L_x složka kolmá na směr letu (L_x kladné napravo od směru letu), h je výška, ve které se v daném integračním kroku nacházíme a h_T výška posledního bodu světelné dráhy, pak

$$\begin{aligned} L &= \int_h^{h_T} (v_l/v_h) dh \\ L_x &= \int_h^{h_T} (v_x/v_h) dh. \end{aligned} \quad (2.61)$$

Obě tyto složky jsou umístěny v horizontální rovině, přesněji řečeno v nulové výšce geoidu, jsou to tedy průměty skutečné dráhy na povrch geoidu. Počáteční hodnoty L a L_x na začátku integrace se berou $L(h_T) = L_x(h_T) = 0$.

Pokud indexem l označíme složky zeměpisných souřadnic ve směru letu meteoroidu a indexem x složky kolmé na směr letu (kladné napravo od směru letu), pak máme v každém kroku

$$\begin{aligned} a_x &= a_R + 90^\circ \\ d\varphi_l &= \frac{1}{(R+h)} \cos a_R dL \\ d\lambda_l &= \frac{1}{(R+h)} \frac{\sin a_R}{\cos \varphi} dL \\ d\varphi_x &= \frac{1}{(R+h)} \cos a_x dL \\ d\lambda_x &= \frac{1}{(R+h)} \frac{\sin a_x}{\cos \varphi} dL. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Úplná změna zeměpisných souřadnic je pak

$$\begin{aligned} d\varphi &= d\varphi_l + d\varphi_x \\ d\lambda &= d\lambda_l + d\lambda_x. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Okamžitý radiant, tedy azimut a zenitová vzdálenost proti směru letu meteoroidu

Tabulka 2.2: Tabelované hodnoty $\Gamma(M)$ pro symetrické těleso

$\Gamma(M)$	0,580	0,618	0,632	0,596	0,552	0,504	0,441	0,389	0,351	0,328
M	4	3	2	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2

$$a = a_R + \arctan\left(\frac{v_x}{v_l}\right) \quad (2.64)$$

$$z = \arctan\left[\frac{(v_l^2 + v_x^2)^{1/2}}{v_h^2}\right].$$

Postup numerického řešení je následovný. Rovnice (2.55) se s dosazením (2.56) začínají počítat ve výšce h_T , nad bodem se zeměpisnými souřadnicemi φ_T a λ_T a s počátečními hodnotami v_l , v_h , v_x a $(\Gamma S)_T$ danými z (2.57) a (2.58). Krok po kroku se pokračuje pomocí aeronomických dat a rovnic (2.59) až (2.64) dokud se nerovná výška h a výška zemského povrchu h_s . Protože předpokládáme symetrický tvar meteoroidu, nemění se jeho koeficient tvaru S . Hodnoty odporového koeficientu Γ jako funkce Machova čísla [2] jsou pro symetrické těleso tabelovány. Hodnoty $\Gamma(M)$ jsou uvedeny v tabulce 2.2. Pro každý krok, a tedy pro každou výšku h můžeme vypočítat v_l , v_h , v_x , L , L_x , φ , λ , a_R a z_R . Pro h_s tedy máme hledané hodnoty pro místo dopadu, jejich standardní odchylky dávají standardní odchylky vypočtených veličin a tím definují pádovou oblast meteoritu, kam těleso dopadlo s pravděpodobností jedné standardní odchylky.

Kapitola 3

Radiometrická měření

Na konci devadesátých let 20. století byly dvě stanice České bolidové sítě (CFN), Ondřejov a Kunžak, vybaveny radiometry a od srpna 1999 zde dochází k pravidelnému radiometrickému pozorování.

Radiometr je přístroj vybavený křemíkovými senzory s citlivostí v optické a infračervené oblasti, a to mezi 400-1200 nm. Narozdíl od fotografických emulzí, které mají největší citlivost v modré oblasti optického spektra, 360-675nm, radiometr má maximální citlivost pro 800-1000 nm. Největší výhodou radiometru je jeho velké časové rozlišení, a to 1200 měření jasnosti celé oblohy za sekundu, a díky rozsahu citlivosti senzorů i fakt, že dokáže detekovat meteory i přes vrstvu mraků. Výhodou je i to, že díky velkému časovému rozlišení se radiometrických záznamů používá ke zkoumání rychlých změn světelných křivek a přesnému určení času přeletu meteoru.

3.1 Kalibrace radiometru

Protože radiometr má jinou oblast citlivosti narozdíl od fotografických desek, bylo potřeba světelné křivky z radiometrických měření kalibrovat s pomocí světelných křivek z klasické fotometrie. K tomuto účelu posloužily dva bolidy, pomalý EN270200 a rychlý EN130800 z meteorického roje Perseid. Fakt, že je třeba odděleně kalibrovat pomalé a rychlé meteory je způsoben oblastí citlivosti radiometru a vlastností rychlých meteorů, které při rychlostech v atmosféře větších než 30 km/s vydávají většinu svého záření prostřednictvím emisních čar kyslíku a dusíku v blízké infračervené oblasti spektra.

Pokud m značíme zdánlivou magnitudu meteoru a I intenzitu radiometrického signálu, pak pro pomalé meteory reprezentované bolidem EN270200 dostáváme převodní vztah

$$m = -2,5 \log I - 5,75 \quad (3.1)$$

a pro rychlé meteory reprezentované bolidem EN130800

$$m = -2,5 \log I - 1,5. \quad (3.2)$$

Díky světelnému znečištění mají radiometry rozlišení 15 jednotek intenzity I , to znamená, že limitní hvězdná velikost pomalých meteorů, které je radiometr ještě schopen zaznamenat, je podle (3.1) $-8,7^m$, pro rychlé meteory je to pak díky (3.2) $-4,4^m$, což potvrzuje vyšší citlivost radiometru pro rychlé meteory.

Část II
Zpracování

Kapitola 4

Měření a výpočty

Během vypracovávání této práce jsem se seznámil s postupem měření a zpracování fotografických snímků bolidů zachycených celooblohovými kamerami a se základními typy redukci těchto snímků. Pomocí programu Fishscan, který v jazyce Fortran vytvořil doktor Jiří Borovička, jsem proměřil a posléze vypočítal elementy dvou bolidů, EN040904A a EN220495.

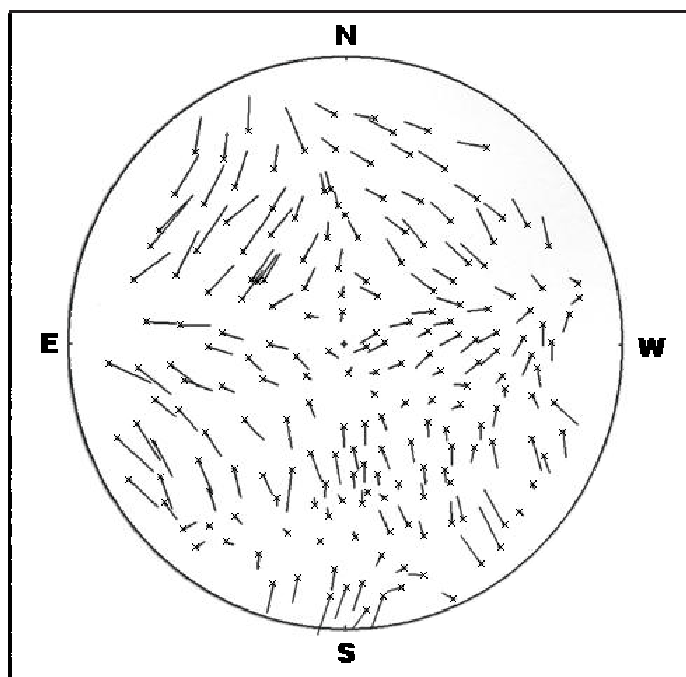
Vlastní proměřování snímků pomocí programu Fishscan se provádí přímo na obrazovce počítače, je tedy nejdříve potřeba snímky digitalizovat. K tomuto účelu slouží v Ondřejově profesionální skener Microtek nesoucí sériové označení ArtixScan2500. Negativy o velikosti 9×12 cm jsem převedl do formátu .tif, přičemž skenování proběhlo v maximálním rozlišení skeneru - 2500 dpi a negativy byly během skenování uchyceny mezi dvěma pevnými deskami, aby se zabránilo jejich prohnutí. V deskách je kruhový otvor o průměru 8 cm, který ohraničuje vlastní obraz oblohy.

4.1 Skener Microtek

Před začátkem používání skeneru bylo potřeba zjistit, jak moc a zda vůbec, dochází ke zkreslení obrazu skenovaného negativu díky případným nepřesnostem skeneru, a tak proběhlo několik měření. Jejich výsledky jsou na obrázcích 4.1, 4.2 a 4.3, kde křížek udává naměřenou polohu hvězdy a od něj jdoucí úsečka vede k poloze hvězdy vypočtené pomocí redukce, udává tak chybu určení polohy hvězdy.

Pomocí programu Fishscan byly postupně pečlivě proměřeny naskenované "ohebné" negativy i starší skleněné fotografické desky. Snímky byly vybrány z pointovaných kamer, kde byl dostatečně vysoký počet hvězd. Na obrázku 4.2 je uveden výsledek redukce 160 poloh hvězd na negativu, kde hrozí zkreslení obrazu prohybem negativu při skenování. Střední chyba určení polohy hvězdy je zde $0,072^\circ$. Na obrázku 4.1 je ale výsledek redukce ze skleněné fotografické desky, kde nemůže dojít ke zkreslení naskenovaného obrazu prohnutím fotodesky, výsledek ale vykazuje stejný typ zkreslení obrazu. Zde bylo měřeno 199 hvězd a střední chyba určení polohy pro jednu hvězdu je $0,051^\circ$. To, že

Obrázek 4.1: Výsledek redukce naskenované skleněné desky



Na obrázku je znázorněn výsledek proměření naskenované skleněné fotodesky, kde nehrozí chyba způsobená prohnutím skenované předlohy. Křížek udává naměřenou polohu hvězdy a od něj jdoucí úsečka vede k poloze hvězdy vypočtené pomocí redukce.

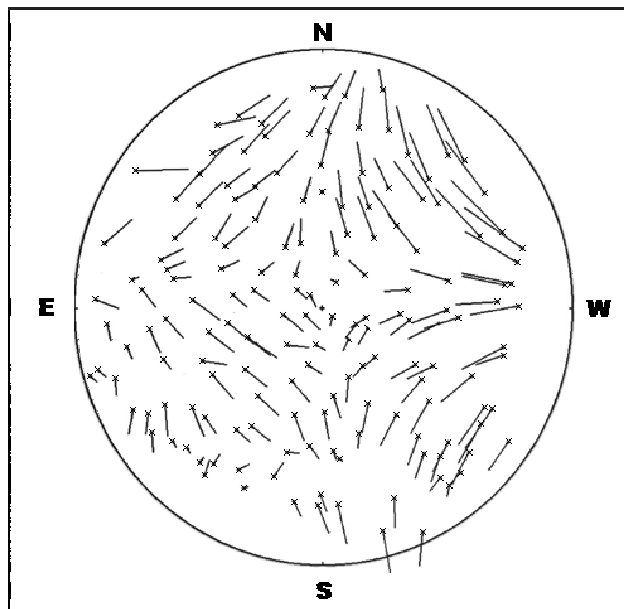
zkreslení opravdu způsobuje skener a ne třeba objektivy použitých kamer je vidět na obrázku 4.3, kde je výsledek redukce 21 hvězd z filmu proměřeného na Ascokordu. Jak je vidět, chyby poloh hvězd zde nevykazují žádný systém a odchylky pro jednotlivé hvězdy jsou zcela náhodné narozdíl od chyb na naskenovaných snímcích. Střední chyba určení polohy jedné hvězdy na obrázku 4.3 je $0,013^\circ$.

Výsledkem pečlivého proměření skenovaných snímků, jak na filmu tak na skleněné desce, je nevhodnost použití tohoto typu skeneru Microtek ArtixScan2500 pro přesné a kvalitní zpracování celoblohových snímků bolidů a jejich následnou redukci pro další vědecké účely.

4.2 Bolidy EN040904A a EN220495A

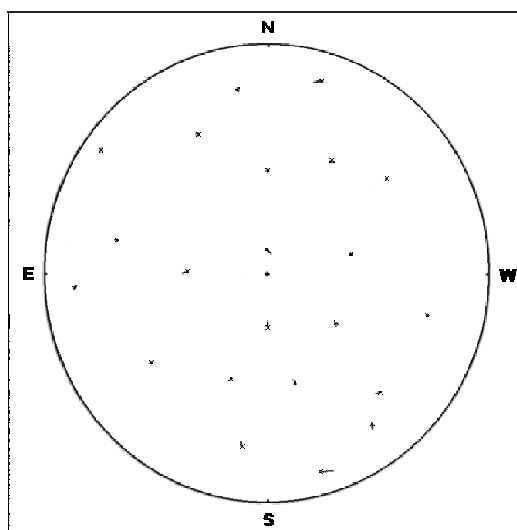
Ačkoli celé měření mělo sloužit hlavně k seznámení se s měřením snímků a výpočtem elementů, výsledek je natolik zajímavý, že stojí za podrobnější rozbor. V tabulce 4.1 je uvedeno porovnání mého měření skenovaných snímků bolidu EN040904A pomocí programu Fishscan s měřením, které bylo provedeno "ručně" na Ascokordu, jednoduše řečeno proměření negativů pod mik-

Obrázek 4.2: Výsledek redukce naskenovaného filmu



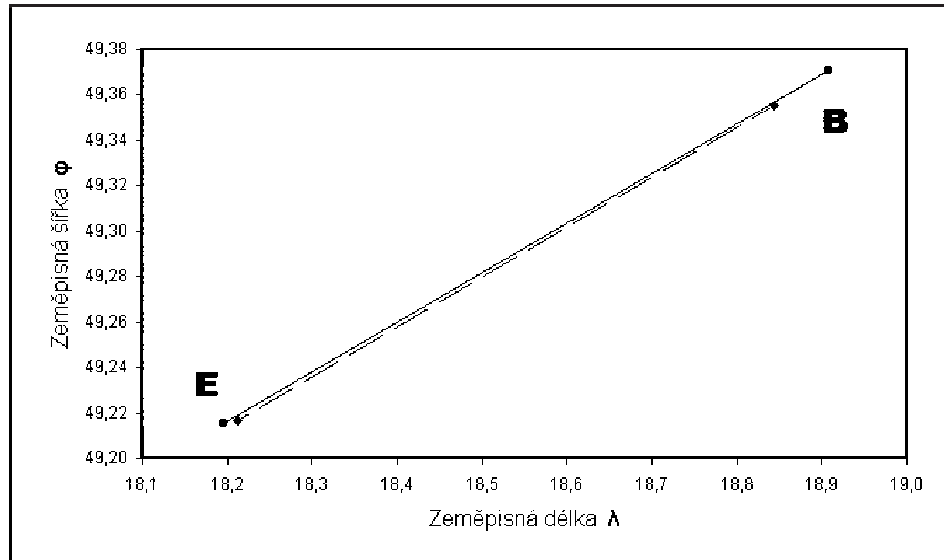
Na obrázku je znázorněn výsledek proměření naskenovaného filmu, kde hrozí chyba způsobená prohnutím skenované předlohy, to se ale výrazně neprojeví. Křížek udává naměřenou polohu hvězdy a od něj jdoucí úsečka vede k poloze hvězdy vypočtené pomocí redukce.

Obrázek 4.3: Výsledek redukce negativu měřeného na Ascorekordu



Na obrázku je znázorněn výsledek proměření negativu pomocí Ascorekordu. Křížek udává naměřenou polohu hvězdy a od něj jdoucí úsečka vede k poloze hvězdy vypočtené pomocí redukce. Chyby poloh hvězd zde nevykazují žádný systém a odchylky pro jednotlivé hvězdy jsou zcela náhodné.

Obrázek 4.4: Průmět atmosférické dráhy bolidu EN040904A

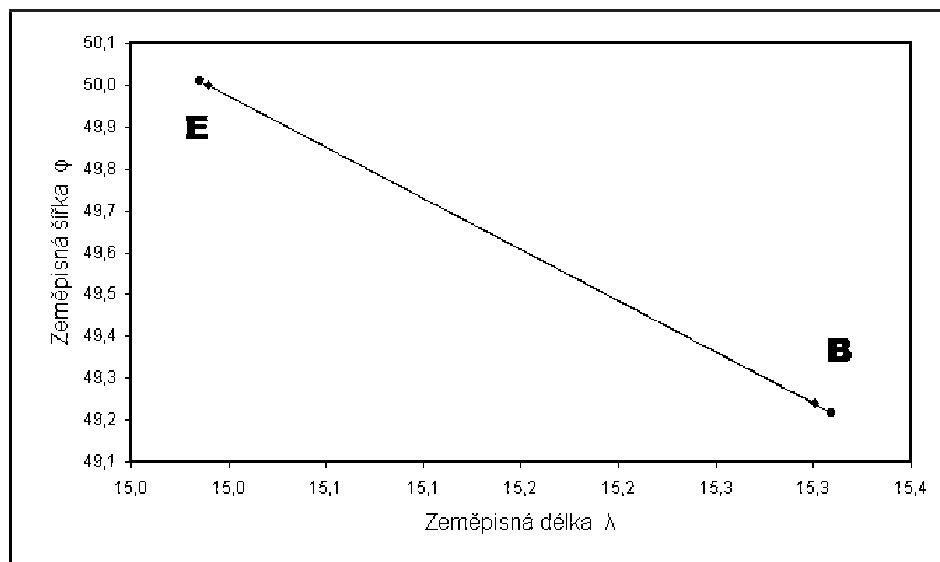


Zeměpisná délka λ je uvedena ve stupních východní délky a zeměpisná šířka ϕ ve stupních severní šířky. Plnou čarou je vyznačen průmět atmosférické dráhy z měření na Ascorkordu (symbol kroužku), přerušované pak měření naskenovaných snímků pomocí programu Fishscan (symbol kosočtverce). Písmenem **B** je vyznačen začátek a písmenem **E** konec bolidu.

roskopem. I když oba typy měření byly dále zpracovávány stejnými programy, MIMI a FIRBAL - oba v jazyce Fortran, výsledky mají jednak různé hodnoty některých parametrů, i když v rámci chyb většinou překrývající se, hlavně ale různé přesnosti. Je jasné, že skenováním negativů dochází jednak ke zkreslení obrazu a dále též ke ztrátě některých informací. To je nejlépe vidět v tabulkách 4.1 a 4.2 na počátečních a koncových výškách meteorů a na jejich celkovém trvání - na negativu je ještě patrná velmi slabá stopa meteorů na jejich začátku a konci, na naskenovaném snímku již ne a tím samozřejmě dochází k jejich zdánlivému zkrácení.

Dochází také ke zkreslení obrazu negativu během skenování, ale přestože bolid EN040904A byl ve srovnání s EN220495A krátký (obrázek 4.6) a dalo by se předpokládat, že během určení polohy jeho atmosférické dráhy nedojde k tak velkému posunu skutečných hodnot (přesněji řečeno hodnot z Ascorkordu), je výsledek opačný (Obrázky 4.4 a 4.5). Skutečnost, že se střední hodnoty atmosférické dráhy bolidu EN220495A, vypočtené pomocí programu Fishscan a Ascorkordu, shodují lépe než u bolidu EN040904A, může být způsobena tím, že díky délce bolidu EN220495A a jeho různé poloze na snímcích se vzájemně vyrušila zkreslení jednotlivých snímků způsobená při skenování. Hlavním rozdílem obou metod je přesnost vypočtených atmosférických poloh, neboť číselné hodnoty jsou si velmi blízké, pro bolid EN220495A je střední přesnost určení polohy libovolného bodu na dráze v atmosféře pomocí Ascorkordu 28 m zatímco u Fishscanu 69 m.

Obrázek 4.5: Průmět atmosférické dráhy bolidu EN220495A



Zeměpisná délka λ je uvedena ve stupních východní délky a zeměpisná šířka φ ve stupních severní šířky. Plnou čarou je vyznačen průmět atmosférické dráhy z měření na Ascorekordu (symbol kroužku), přerušované pak měření naskenovaných snímků pomocí programu Fishscan (symbol kosočtverce). Písmenem **B** je vyznačen začátek a písmenem **E** konec bolidu.

Výsledkem proměření bolidů EN040904A a EN220495A je tedy to, že program Fishscan je schopen dát v rozumně krátkém čase sice méně přesné a méně spolehlivé hodnoty, ale postačující i jako finální data pro meteory, které není potřeba počítat co nejpřesněji, dává hodnoty dostatečně dobré pro rychlou orientaci a kvalitní předběžné výsledky, které nám s jistotou řeknou, jak moc je daný případ vyjíměčný z hlediska hloubky průniku do atmosféry či množství zbytkové hmoty. Kvalitní proměření jednoho naskenovaného snímku totiž trvá pouze hodinu, tedy měření snímků ze všech stanic, které bolid zachytily, zabere maximálně jeden den, což je ve srovnání s týdnem až deseti dny, potřebnými k přesnému proměření negativů na Ascorekordu, výborný výsledek, protože v případě pádu meteoritu již druhý den známe místo dopadu, byť s poněkud větší chybou.

Tabulka 4.1: Srovnání výsledků měření bolidu EN040904A

Proměření snímku	Ascorekord	Fishscan
Datum a čas	4.9.2004, T = 21 ^h 47 ^m 47,8 ^s ± 0,3 ^s UT	
	Atmosférická dráha	
v_B [km/s]	65,45 ± 0,10	65,82 ± 0,10
v_E [km/s]	65 ± 1	65 ± 1
h_B [km]	117,374 ± 0,004	113,58 ± 0,03
h_E [km]	71,865 ± 0,002	73,08 ± 0,02
λ_B [°v.d.]	18,90754 ± 0,00005	18,8433 ± 0,0003
φ_B [°s.š.]	49,37062 ± 0,00004	49,3554 ± 0,0003
λ_E [°v.d.]	18,19596 ± 0,00003	18,2118 ± 0,0003
φ_E [°s.š.]	49,21516 ± 0,00003	49,2165 ± 0,0003
Celková délka [km]	71,68	63,71
Trvání [s]	1,10	0,97
Typ	III A	III A
Stanice	16, 12, 9	16, 12, 9, 14, 15, 17, 11, 4
	Radiant (J2000.0)	
α_R [°]	42,455 ± 0,004	42,42 ± 0,05
δ_R [°]	39,842 ± 0,002	39,95 ± 0,03
α_G [°]	42,769 ± 0,004	42,73 ± 0,05
δ_G [°]	39,774 ± 0,002	39,88 ± 0,03
v_∞ [km/s]	65,45 ± 0,10	65,82 ± 0,10
v_G [km/s]	64,27 ± 0,10	64,64 ± 0,11
	Dráhové elementy (J2000.0)	
a [AU]	24 ± 5	200
e	0,969 ± 0,007	0,996 ± 0,007
q [AU]	0,7474 ± 0,0013	0,7533 ± 0,0015
Q [AU]	48 ± 11	400
ω [°]	241,7 ± 0,3	240,4 ± 0,3
Ω [°]	162,62185 ± 0,00001	162,62185 ± 0,00001
i [°]	137,14 ± 0,05	137,14 ± 0,07

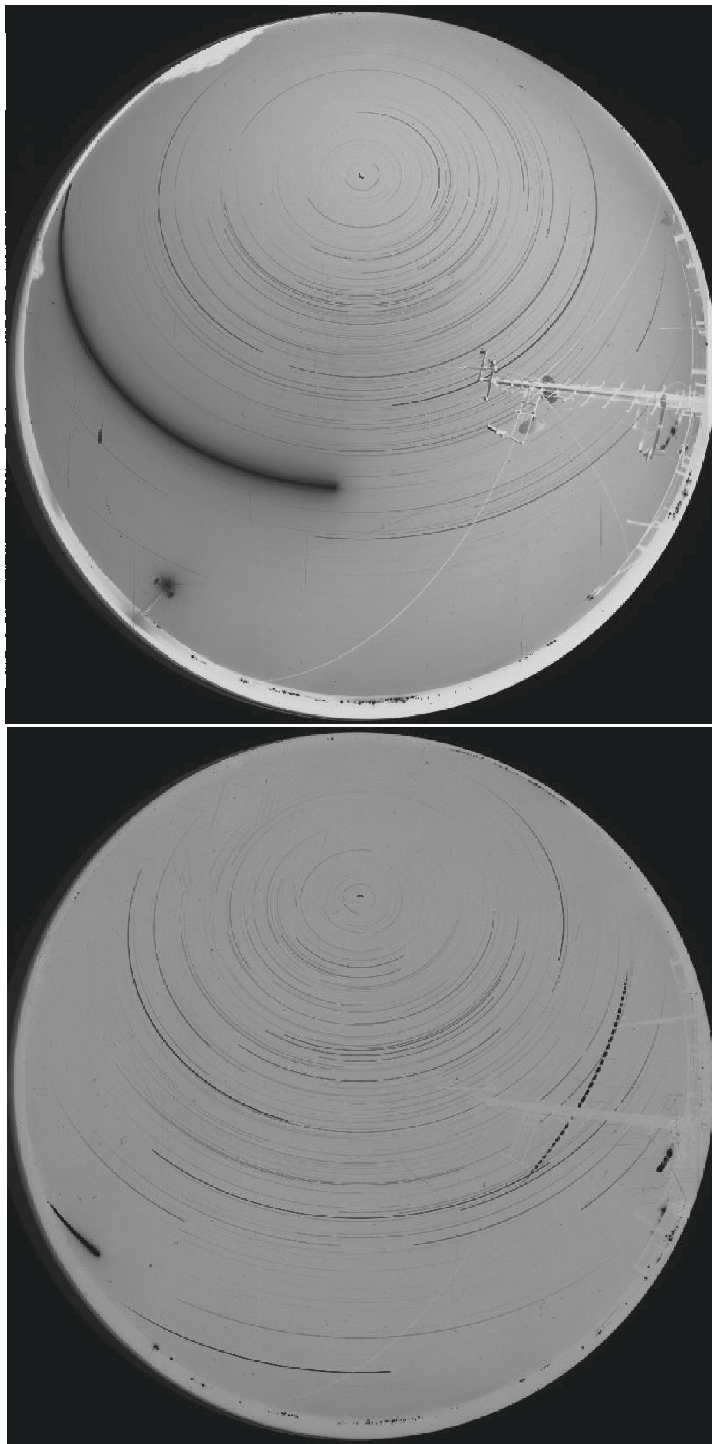
Index **B** označuje počáteční hodnoty, index **E** hodnoty koncové. α_R , δ_R je pozorovaný radiant, α_G , δ_G geocentrický radiant, v_∞ počáteční mimoatmosférická rychlost a v_G je rychlost geocentrická.

Tabulka 4.2: Srovnání výsledků měření bolidu EN220495A Kourim

Proměření snímku	Ascorekord	Fishscan
Datum a čas	22.4.1995, T = 22 ^h 28 ^m 40 ^s ± 3 ^s UT	
	Atmosférická dráha	
h_B [km]	89,962 ± 0,015	88,35 ± 0,03
h_E [km]	30,423 ± 0,011	31,39 ± 0,03
λ_B [°v.d.]	15,3090 ± 0,0002	15,3001 ± 0,0005
φ_B [°s.š.]	49,21761 ± 0,00010	49,2389 ± 0,0002
λ_E [°v.d.]	14,9853 ± 0,0002	14,9897 ± 0,0005
φ_E [°s.š.]	50,00898 ± 0,00007	50,0004 ± 0,0002
Celková délka [km]	109,53	105,19
Trvání [s]	3,91	3,71
Typ	I	I
Stanice	20, 15, 9, 4, 11, 14, 16, 17	20, 15, 9, 4, 11, 14, 16, 17
	Radiant (J2000.0)	
α_R [°]	215,41 ± 0,01	215,39 ± 0,02
δ_R [°]	-6,425 ± 0,009	-6,57 ± 0,02
α_G [°]	215,23 ± 0,01	215,20 ± 0,02
δ_G [°]	-9,183 ± 0,010	-9,33 ± 0,02
v_∞ [km/s]	27,559 ± 0,005	27,592 ± 0,005
v_G [km/s]	25,136 ± 0,006	25,173 ± 0,006
	Dráhové elementy (J2000.0)	
a [AU]	2,379 ± 0,003	2,387 ± 0,004
e	0,7883 ± 0,0002	0,7893 ± 0,0003
q [AU]	0,5036 ± 0,0002	0,5028 ± 0,0003
Q [AU]	4,255 ± 0,005	4,271 ± 0,008
ω [°]	277,59 ± 0,02	277,65 ± 0,05
Ω [°]	32,38566 ± 0,00004	32,38550 ± 0,00004
i [°]	4,108 ± 0,009	3,99 ± 0,02

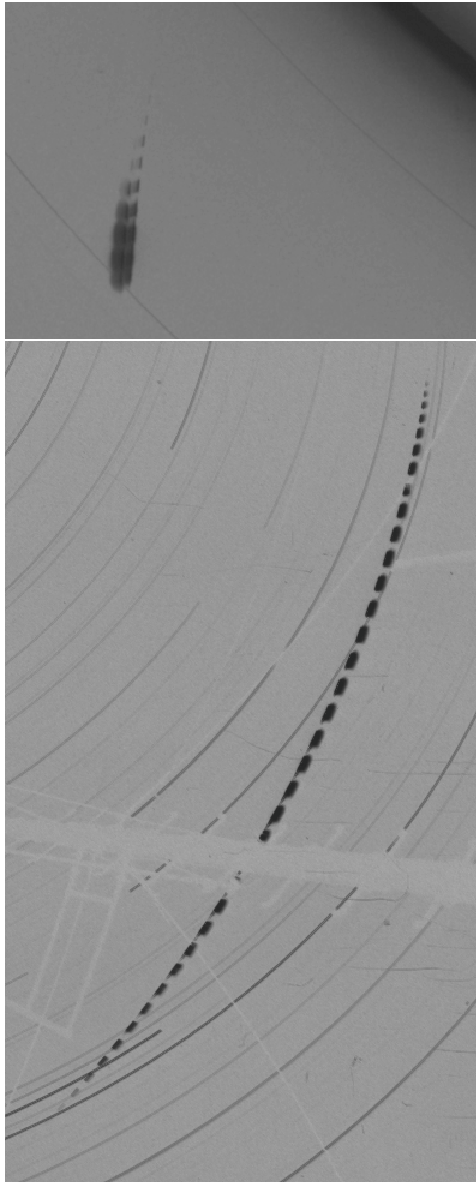
Index **B** označuje počáteční hodnoty, index **E** hodnoty koncové. α_R , δ_R je pozorovaný radiant, α_G , δ_G geocentrický radiant, v_∞ počáteční mimoatmosférická rychlost a v_G je rychlost geocentrická.

Obrázek 4.6: Naskenované snímky bolidů EN040904A a EN220495



Na horním obrázku je v jeho levé části zobrazen hned pod stopou Měsíce bolid EN040904A, na dolním obrázku je pak bolid EN220495 Kouřim zachycen vpravo uprostřed. Oba snímky jsou ze stanice 9 - Svratouch. Detaily obou bolidů z těchto snímků jsou na následujícím obrázku.

Obrázek 4.7: Detaily bolidů EN040904A a EN220495A z naskenovaných snímků



Na horním obrázku je bolid EN040904A, na dolním obrázku pak bolid EN220495A Kouřim. Oba snímky jsou ze stanice 9 - Svratouch.

Kapitola 5

Statistika základních elementů

V této kapitole jsou prezentovány výsledky statistického zpracování 260 bolidů zachycených Českou bolidovou sítí (CFN) od jejího založení do současnosti. Od roku 1947 bylo samozřejmě vyfotografováno mnohem více bolidů než 260, jedná se o rojové meteory, kterých je nafceno několik stovek, ty jsem ale do statistiky nezařadil. Od každého roje jsem použil vždy jen několik bolidů a zařadil jsem pouze hlavní roje jako Perseidy, Leonidy, Orionidy, S a N Tauridy, Drakonidy, η Aquaridy nebo například Geminidy. Z celkového použitého počtu bolidů tvoří ty rojové přibližně 30 %.

5.1 Četnost typů bolidů

Ještě před statistikou dráhových elementů jednotlivých typů meteorů je dobré říci, jak často vůbec dochází k jejich pádům a o jak velká tělesa se přibližně jedná.

V tabulce 5.1 jsou uvedeny počty jednotlivých typů a jejich přibližné procentuální zastoupení. Protože při určení typu bolidu pomocí PE kriteria [7] může dojít k nejednoznačnosti přiřazení, je mezi bolidy typu I zařazeno 8 takových, které jsou na pomezí typů I-II, mezi bolidy typu II je 7 mezních mezi typy II-IIIa a u meteorů typu IIIa jsou 4, které jsou na pomezí typů IIIa-IIIb. K bolidům typu IIIb nebyly přiřazeny žádné meteory mezního typu.

Z výše uvedeného důvodu je v tabulce 5.1 uvedeno jen přibližné procentuální zastoupení. Dále je zde uvedeno, jaký počet jednotlivých typů bolidů má počáteční hmotnost m_{∞} větší než 1 kg a kolik jich má koncovou hmotnost v intervalech 1-5 kg, 5-10 kg a nebo větší než 10 kg. V tabulce 5.2 jsou uvedeny všechny případy, kdy koncová hmotnost tělesa po ukončení ablace činila alespoň 1 kg a v tabulce 5.3 jsou uvedeny bolidy s počáteční hmotností nad 1000 kg [9].

Tabulka 5.1: Počty typů bolidů

Typ	N	\approx %	$m_{\infty} \geq 1$ kg	$m_E \in 1 - 5$ kg	$m_E \in 5 - 10$ kg	$m_E > 10$ kg
I	84	32	61	8	2	7
II	82	32	61	4	2	0
IIIA	53	20	10	0	0	0
IIIB	38	15	22	0	0	0

Vysvětlení symbolů: N - počet; \approx % - přibližné procentuální zastoupení; $m_{\infty} \geq 1$ kg - počet bolidů s počáteční hmotností vyšší než 1 kg, m_E - koncová hmota.

5.2 Dráhové elementy

Výsledky z grafů na obrázcích 5.1 až 5.4 jsou číselně shrnuty do tabulky 5.4, kde charakteristické hodnoty jednotlivých dráhových elementů znamenají jejich nejčastěji vyskytující se hodnoty. Na obrázku 5.1 je uvedena statistika hlavní poloosy v rozmezí 1 – 5 AU, a to pouze pro typy I a II. Pro typy IIIA a IIIB taková statistika nemá smysl, protože většina heliocentrických drah těles, která způsobují tyto meteory mají velkou hlavní poloosu, přesněji řečeno 50 % bolidů typu IIIA a 30 % bolidů typu IIIB má $a > 10$ AU.

Na obrázku 5.2 je uvedena statistika afelové vzdálenosti typů I a II. Tyto grafy nejlépe ukazují, že meteory typů I a II jsou asteroidálního původu, a to převážně z hlavního pásu asteroidů. Počet meteorů typu I s heliocentrickou drahou, která má $Q \leq 5,2$ AU je totiž 81 %, počet takových meteorů typu II pak dokonce 83 %.

Obrázek 5.4 ukazuje statistiku excentricity všech typů meteorů. U typů IIIA a IIIB je dobře vidět nárůst počtu meteorů, jejichž heliocentrické dráhy byly s excentricitou rovnou jedné, což odpovídá drahám dlouhoperiodických komet a jen potvrzuje kometární původ těchto typů meteorů.

Obrázek 5.3 ukazuje statistiku sklonu heliocentrické dráhy pro meteory typu I a II. 60 % meteorů typu I mělo sklon menší než 12° a sklon roviny heliocentrické dráhy pod 12° mělo 67 % meteorů typu II. Podobně jako u hlavní poloosy ani zde nemá smysl zobrazovat rozdělení podle velikosti sklonu k ekliptice pro meteory typů IIIA a IIIB, protože díky podtypům IIIAi a C3 je sklon dráhy náhodný v rozsahu celého intervalu $0^\circ - 180^\circ$, samozřejmě kromě meteorů příslušejících ke stejnému roji. Za zmínku ještě stojí to, že 35 % meteorů typu IIIA se ve sluneční soustavě pohybovalo po retrográdních drahách, meteorů typu IIIB pak 20 %.

Závěrem z tohoto statistického zpracování je to, že mateřská tělesa pro bolidy typů I a II jsou z hlavního pásu asteroidů, kdežto pro typy IIIA a IIIB jsou mateřskými tělesy komety.

Tabulka 5.2: Bolidy s koncovou hmotností nad 1 kg

Označení	Jméno	Datum pádu	Typ	m_E [kg]
19241	Příbram	7.4. 1959	I	50
EN100469	Otterskirchen	10.4. 1969	II	5
EN210372A	Büdingen	21.3. 1972	II	8
EN300874	Leutkirch	30.8. 1974	I	14
EN120677	The Alps	12.6. 1977	I	30
EN250280	-	25.2. 1980	II	1,6
EN091083	Žďár	9.10. 1983	I	1,5
EN041283A	Neuberg	4.12. 1983	I	4
EN030884	Valeč	3.8. 1984	I	16
EN130885	Valmez	13.8. 1985	I	2,1
EN160885	Köln		II	1
EN041087	Janov	4.10. 1987	I	75
EN241287	-	24.12. 1987	II	10
EN140588	-	14.5. 1988	II	1
EN070591	Benešov	7.5. 1991	I-II	10
EN090392	Neuberg III	9.3. 1992	I	10
EN220293	Meuse		I	2,7
EN251095A	Tisza	25.10. 1995	I	2,6
EN231195	Jindřichův Hradec		I	2
EN310800	Vimperk		I	5
EN171101A	Turji-Remety		I	400
EN060402	Neuschwanstein		I	20

Pomlčka znamená, že bolid nebyl pojmenován.

Tabulka 5.3: Bolidy s počáteční hmotností nad 1000 kg

Označení	Jméno	Datum pádu	Typ	m_{∞} [kg]
19241	Příbram	7.4. 1959	I	21500
EN151068	Čechtice	15.10. 1968	II	1600
EN100469	Otterskirchen	10.4. 1969	II	5000
EN141170	Mt. Riffler	14.11. 1970	I	3000
EN170171	Würzburg	17.1. 1971	IIIB	3200
EN041274	Šumava	4.12. 1974	IIIB	5000
EN010677	Freising	1.6. 1977	II	5200
EN140977A	Brno	14.9. 1977	II	1500
EN070591	Benešov	7.5. 1991	I	13000
EN220293	Meuse	22.2. 1993	I	3000
EN231195	Jindřichův Hradec	23.11. 1995	I	3600
EN060500	Morávka	6.5. 2000	I	1500
EN171101	Turji-Remety	17.11. 2001	I	4300

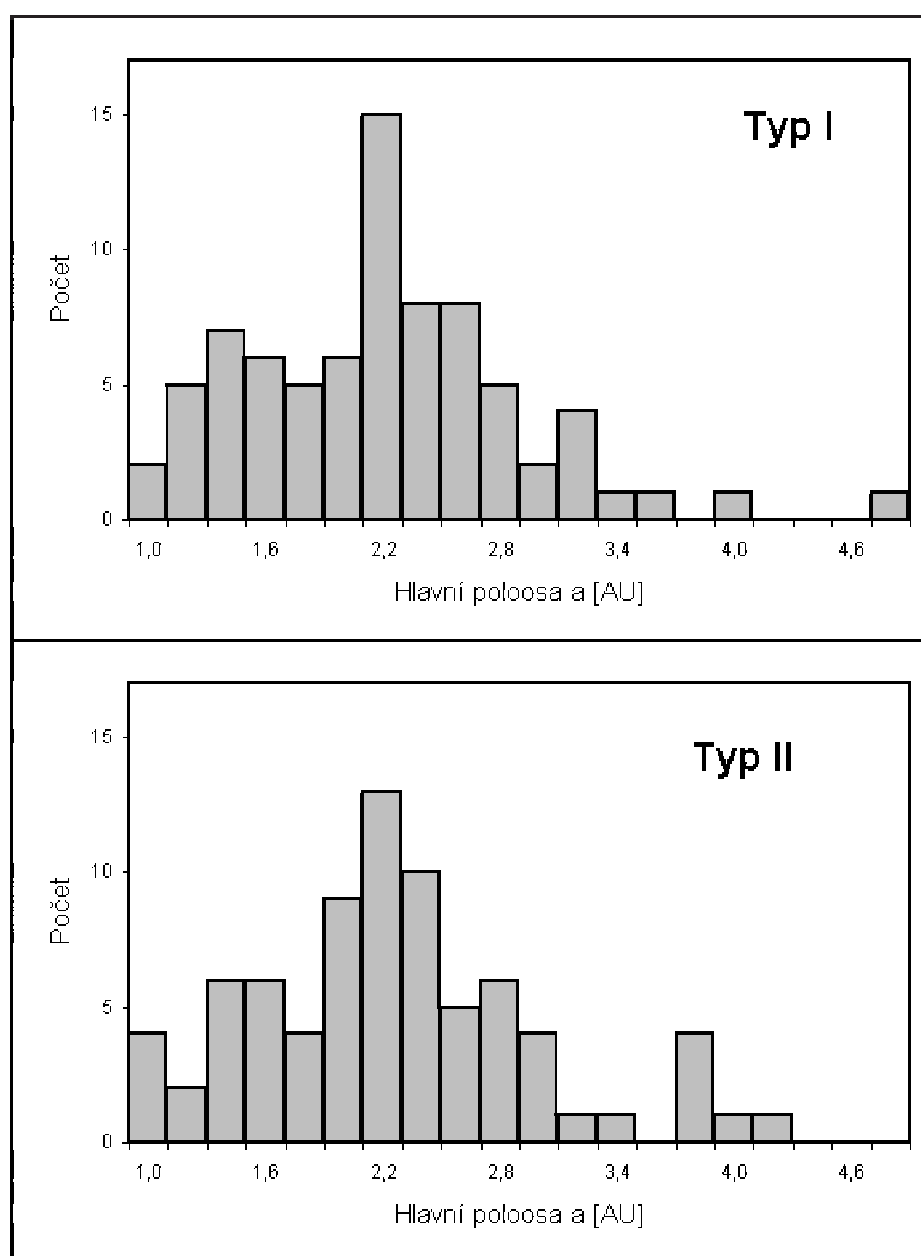
Bolid Morávka je denním bolidem, který nebyl zaznamenán pomocí CFN, určení jeho elementů bylo provedeno na základě tří videozáznamů, na kterých byl zachycen. EN060500 Morávka je tedy pouze jeho označením a nemá nic společného s Evropskou bolidovou sítí (EN - European Network).

Tabulka 5.4: Statistika základních elementů

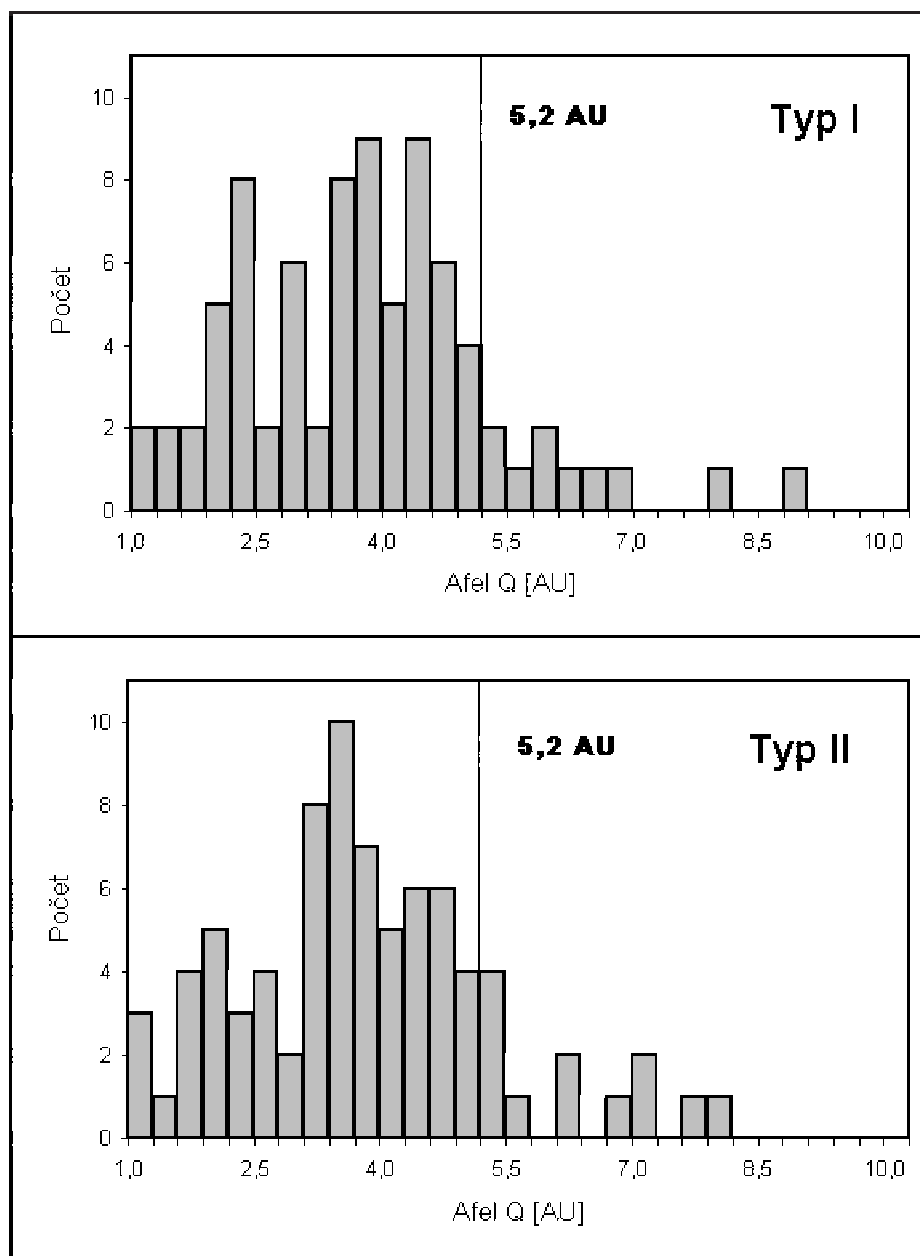
Typ	charakteristické dráhové elementy			
	a	e	i	Q
I	$2,2 \pm 0,2$	$0,68 \pm 0,20$	$3^{\circ} \pm 2^{\circ}$	4 ± 1
II	$2,3 \pm 0,2$	$0,65 \pm 0,10$	$3^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$3,7 \pm 0,6$
IIIA	-	$0,84 \pm 0,05$	-	-
IIIB	-	$0,70 \pm 0,05$	-	-

Pomlčka znamená, že daný element může nabývat libovolné hodnoty v intervalu dávajícím smysl, tedy $0 - \infty$ astronomických jednotek pro **a** a **Q** a $0^{\circ} - 180^{\circ}$ pro **i**.

Obrázek 5.1: Hlavní poloosa a

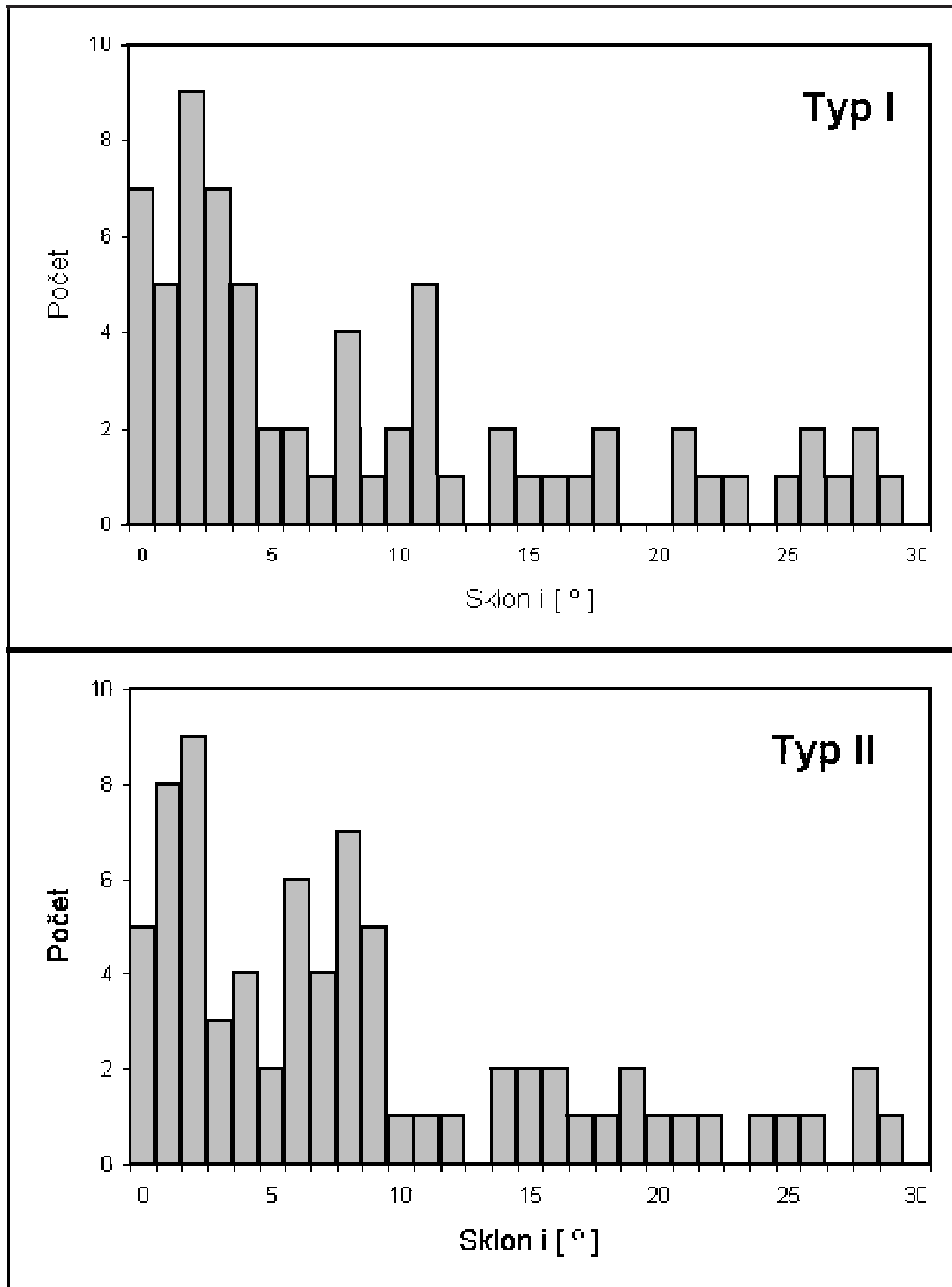


Obrázek 5.2: Afel Q

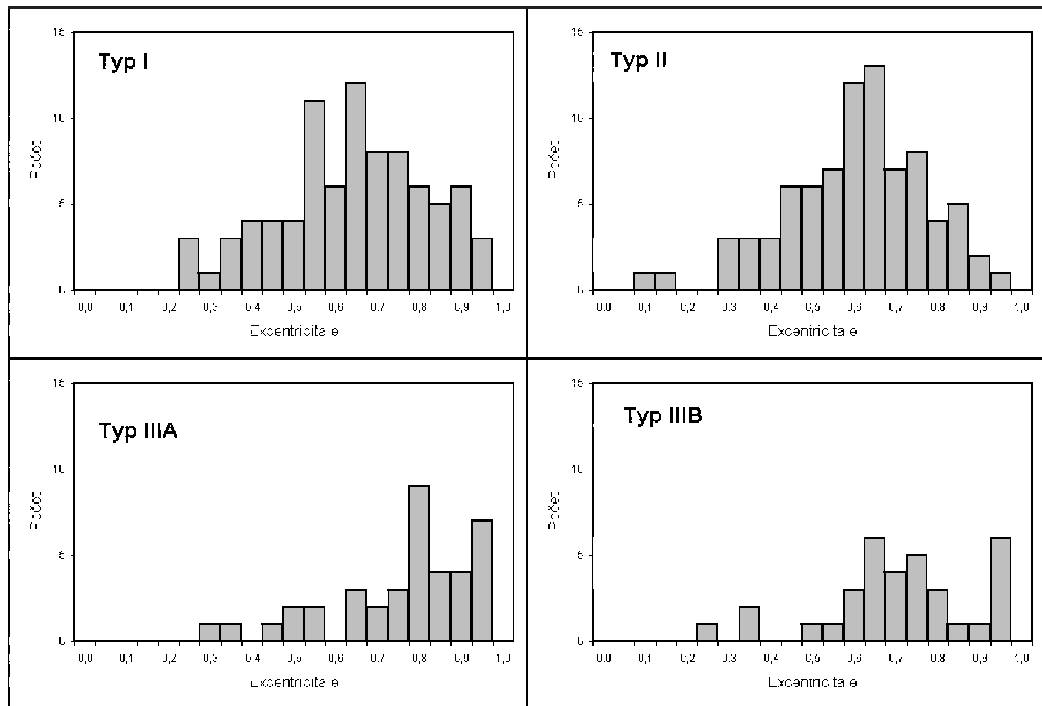


Na ose x je vyznačena střední vzdálenost Jupitera od Slunce 5,2 AU.

Obrázek 5.3: Sklon i



Obrázek 5.4: Excentricita e



5.3 Výjimečné případy

Jako ve všech vědeckých oborech je i v astronomii příroda natolik rozmanitá, že se i mezi bolidy najdou takové, které neodpovídají běžně se vyskytujícím případům. V tabulce 5.5 jsou vybrány bolidy, které jsou buď něčím zvláštní nebo patří mezi ty vzácněji se vyskytující případy meteorů, které můžeme pozorovat ze Země. Upozorňuji jen, že neexistuje žádné pravidlo pro to, kdy říct, že daný meteor je výjimečný nebo zvláštní, uvádím zde tedy ty, které přišly neobvyklé právě mě. Většinou se samozřejmě jedná o bolidy, které se vyskytly jen párkrát nebo dokonce jen jednou za celou historii CFN.

Mezi bolidy s excentricitou větší než jedna patří meteor EN140977C, jehož heliocentrická dráha měla výstřednost $1,12 \pm 0,06$. EN140977C se pohyboval po retrográdní dráze s hodnotou hlavní poloosy jdoucí k nekonečnu, tedy po typické kometární dráze. Dalším meteorom s velkou excentricitou je EN201284, a to $e = 2,1 \pm 0,3$, pohyboval se také po retrográdní dráze s hodnotou hlavní poloosy jdoucí k nekonečnu, ale na základě jeho atmosférického chování se jedná o meteor typu I, což může vypovídat o různorodosti kometárních těles. Posledním meteorom s velkou excentricitou je EN231095B, $e = 1,046 \pm 0,004$. Tento meteor se pohyboval po prográdní dráze v rovině ekliptiky s hodnotou hlavní poloosy jdoucí k nekonečnu. Mezi méně časté případy patří také bolidy s heliocentrickou drahou typu aten, tedy s hlavní poloosou menší než

Tabulka 5.5: Výjimečné případy bolidů

Označení	Jméno	Datum pádu	Typ	Popis zvláštnosti
EN140977C	-	14.9. 1977	IIIA	$e > 1$
EN201284	-	20.12. 1984	I	$e > 1$
EN241287	-	24.12. 1987	II	dráha typu aten
EN090392	Neuberg III	9.3. 1992	I	dráha typu aten
EN231095B	Herálec	23.10. 1995	IIIA	$e > 1$
EN010697	Karlštejn	1.6. 1997	I	typ I na retrográdní dráze
EN281097B	Sava	28.10. 1997	II	dráha typu aten
EN310800	Vimperk	31.8. 2000	I	dráha typu aten
EN170702	Jeseník	17.7. 2002	I	dráha téměř typu aten
EN280902	Velvary	28.9. 2002	II	typ II na retrográdní dráze
EN300704	Popelín	30.7. 2004	IIIB	typ IIIB na dráze typu aten

Pomlčka znamená, že bolid nebyl pojmenován.

1 AU. EN241287 měl $a = 0,714 \pm 0,003$ AU, $e = 0,521 \pm 0,009$ a pohyboval se v rovině ekliptiky. EN090392 měl $a = 0,96 \pm 0,01$ AU, $e = 0,267 \pm 0,007$ a $i = 25,2^\circ \pm 0,2^\circ$. EN281097B měl $a = 0,6977 \pm 0,0006$ AU, $e = 0,479 \pm 0,002$ a $i = 29,6^\circ \pm 0,6^\circ$. EN310800 měl $a = 0,7969 \pm 0,0002$ AU, $e = 0,2952 \pm 0,0003$ a $i = 16,74^\circ \pm 0,02^\circ$. Bolidem s dráhou pravděpodobně typu aten je EN170702, jehož elementy byly $a = 1,0002 \pm 0,0011$ AU, $e = 0,5343 \pm 0,0004$ a $i = 14,12^\circ \pm 0,04^\circ$. Posledním meteoritem s heliocentrickou drahou typu aten je EN300704, který je ale typ IIIB, tedy nejspíše kometárního původu. Jeho elementy jsou $a = 0,7327 \pm 0,0001$ AU, $e = 0,3965 \pm 0,0002$ a $i = 11,30^\circ \pm 0,02^\circ$.

To, že se v naší sluneční soustavě vyskytují na retrográdních drahách i tělesa, jejichž chování v atmosféře Země je typické pro tělesa patřící k nejpevnější složce meziplanetární hmoty, obvykle spojované s asteroidy, dokazuje bolid EN010697, jehož sklon dráhy byl $i = 137,9^\circ \pm 0,1^\circ$. Hodnoty dalších elementů heliocentrické dráhy jsou $a = 3,6 \pm 0,2$ AU, $e = 0,72 \pm 0,02$. Bolid Karlštejn reprezentuje jeden z nejsilnějších důkazů existence složky komet s vysokou hustotou a je vůbec prvním vyfotografovaným bolidem tohoto typu. Z CFN byl také zachycen jeden bolid typu II s retrográdní heliocentrickou drahou. Jedná se o EN280902, jeho elementy jsou $a = 47 \pm 7$ AU, $e = 0,981 \pm 0,003$ a $i = 101,41^\circ \pm 0,03^\circ$.

Literatura

- [1] Ceplecha Z., Borovička J., Elford W. G., ReVelle D. O., Hawkes R. L., Porubčan V., Šimek M. (1998): Meteor phenomena and bodies. *Space Sci. Rev.* 84, 327 - 471
- [2] Ceplecha Z. (1987): Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 38, 222 - 234
- [3] Borovička J., Spurný P., Keclíková J. (1995): A new positional astrometric method for all-sky cameras. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 112, 173 - 178
- [4] Spurný P., Spalding R. E., Jacobs C. (2001): Common ground-based optical and radiometric detection within Czech Fireball Network. In *meteoroids 2001, ESA – SP 495*, 135 - 140
- [5] Halliday I. (1996): Detailed data for 259 fireballs from the Canadian camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids. *Meteoritics and Planetary Sciences* 31, 185 – 217
- [6] Borovička J. (1992): Astrometry with all-sky cameras. *Publications of the Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, Publication No.79*, 19 – 22
- [7] Ceplecha Z., McCrosky R. E. (1976): Fireball and heights: A diagnostic for the structure of meteoric material. *Journal of geophysical research* vol. 81, No. 35, 6257 – 6275
- [8] Plavec M. (1956): Meteorické roje, *Nakladatelství československé akademie věd*, 173 – 161
- [9] Spurný P., Oberst J., Heinlein D. (2003): Photographic observations of Neuschwanstein, a second meteorite from the orbit of the Příbram chondrite. *Nature* vol. 423, 151 – 153