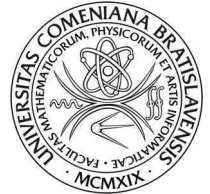




Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



**Meno a priezvisko**  
Jiří Šilha

**Autoreferát dizertačnej práce**

Identifikácia populácie umelých telies v blízkom okolí Zeme

**na získanie akademického titulu philosophiae doctor**

**v odbore doktorandského štúdia:**

4.1.7.-8. Astronómia a astrofyzika

**Miesto a dátum:**

Bratislava, 2012

(2. strana autoreferátu)

**Dizertačná práca bola vypracovaná**

(v dennej forme doktorandského štúdia)

**na** (Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave)

**Predkladateľ:**

**Mgr. Jiří Šilha**

Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky  
Oddelenie astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

**Školiteľ:**

**prof. RNDr. Vladimír Porubčan, DrSc**

Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky  
Oddelenie astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

**Oponenti:**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

(meno a priezvisko oponenta s uvedením jeho titulov a hodností  
a názov ustanovizne, s ktorou je oponent v pracovnom pomere)

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná ..... o ..... h  
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou  
predsedom odborovej komisie .....**

(uviesť dátum vymenovania)

4.1.7 – 8 Astronómia a astrofyzika

(študijný odbor) (názov študijného programu doktorandského štúdia)

**na**

Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Oddelenie astronómie, fyziky Zeme a meteorológie  
Mlynská dolina  
84248 Bratislava

**Predseda odborovej komisie:**

doc. RNDr. Jozef Klačka, CSc.  
Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky  
Oddelenie astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Optické pozorovania kozmického smetia</b> .....	<b>5</b>
2.1	Program na identifikáciu kozmického smetia a presnosť efemeríd .....	5
2.2	Pozorovacia stratégia kozmického smetia .....	5
2.3	Výpočet geocentrických dráhových elementov .....	6
<b>3</b>	<b>Meteory tvorené kozmickým smetím</b> .....	<b>6</b>
3.1	Fyzika meteorov a priestorové rozloženie častíc kozmického smetia .....	6
3.2	Detekčná frekvencia.....	7
<b>4</b>	<b>In situ merania uskutočnené na Medzinárodnej vesmírnej stanici</b> .....	<b>7</b>
4.1	Fotografovanie a meranie kráterov .....	8
4.2	Modelovanie početnosti pomocou dopadov meteoroidov .....	8
4.3	Modelovanie početnosti pomocou vyvrhnutých častíc zo sekundárnych zdrojov.....	9
<b>5</b>	<b>Závery</b> .....	<b>9</b>
	<b>Referencie</b> .....	<b>13</b>
	<b>Zoznam publikácií</b> .....	<b>15</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>156</b>

# 1 Úvod

V dizertačnej práci sa zaoberáme problematikou kozmického smetia. Jedná sa o človekom vytvorené telesá, ktoré sa nachádzajú na obežnej dráhe okolo Zeme a buď po ukončení misie alebo ako fragmenty pôvodného telesa už neslúžia žiadnemu účelu. Dosahujú rôzne rozmery od mikrometrových častíc vzniknutých počas horenia tuhého paliva, cez milimetrové odlúpené časti až po metrové satelity a nosné rakety.

V dizertácii prezentujeme výsledky z našich pozorovaní populácie kozmického smetia, jej identifikácie z expozičných snímok a jej modelovania. S použitím súčasných analytických modelov pohybu telies na geocentrických dráhach (Vallado a kol., 2006) a dostupných aktuálnych dráhových elementov sme pozorovali niekoľko satelitov a nosných rakiet z dôvodu testovania presnosti tejto metodiky. Taktiež sme testovali metódy na výpočet geocentrických elementov z malých pozorovacích uhlov. Zistili sme, že s využitím kombinácie navrhnutých metód (Bucerius, 1950; Escobal, 1965; Montenbruck & Gill, 2000) možno s vysoko pravdepodobnosťou získať elementy dráhy ako sklon a dĺžka výstupného uzla pre pozorované teleso a vo väčšine prípadov aj ostatné elementy. Na základe pozorovacej stratégie NASA (Abercromby et al., 2011) sme uskutočnili niekoľko pozorovaní pomocou hlavného ďalekohľadu na našom univerzitnom observatóriu. Ako v práci ukazujeme, pri fotometrii kozmického smetia sme získali kvalitné výsledky a ukázali sme, že navrhnutý pozorovací postup je vhodný aj pre naše pozorovacie podmienky.

Súčasťou práce sú tiež analýzy možnosti vytvorenia meteoru pomocou malých častíc kozmického smetia. Využili sme pri tom meteorický model (Pecina a Ceplecha, 1983) a NASA model Debris Assessment Software (DAS) aby sme zistili životnosti kozmického smetia v danom roku. Vypočítali sme, že zachytenie meteoru vytvoreného časticami kozmického smetia pomocou našich celooblohových televíznych kamier je málo pravdepodobné. Podľa súčasných modelov kozmického smetia ORDEM2000, MASTER-2005 a MASTER-2009 je to len rádovo niekoľko meteorov za desaťročie.

V poslednej kapitole sa zaoberáme analýzou povrchov dvoch panelov, ktoré boli viac ako osem rokov nainštalované na vonkajšej časti Medzinárodnej vesmírnej stanice ISS. Zaujímali nás vzniknuté štruktúry na povrchu oboch panelov, hlavne krátery. Získané údaje môžu byť použité k overeniu správnosti alebo aktualizovania meteoroidných modelov a modelov kozmického smetia. Použili sme najnovší model MASTER-2009 a model pre tvorbu častíc vyvrhnutých po dopade meteoroidu alebo kozmického smetia na niektorú z plôch ISS (Rival a

Mandeville, 1999). Naše modelovanie ukázalo, že s použitím spomínaných modelov je možné dostatočne vysvetliť dáta namerané na analyzovaných paneloch.

## **2 Optické pozorovania kozmického smetia**

S kozmickým smetím sa možno v astronómii stretnúť pri rôznych typoch pozorovaní. Ako ukazujú skúsenosti na Astronomickom a geofyzikálnom observatóriu FMFI UK v Modre (AGO) to môže byť náhodne počas fotometrie a astrometrie blízkozemských planétok hlavným 0,6-metrovým ďalekohľadom, alebo celooblohovým televíznym systémom na pozorovanie meteorov (Tóth a kol., 2011) (ďalej celooblohový systém), poprípade cielene oboma prístrojmi. Na expozičných snímkach zväčša umelé telesá zanechajú lineárnu stopu.

### **2.1 Program na identifikáciu kozmického smetia a presnosť efemeríd**

Za posledných päť rokov sa na AGO pozorovalo niekoľko desiatok umelých telies, či už náhodne alebo cielene. Tieto telesa sa následne podľa možnosti identifikovali a to tak, že sa porovnali vzájomné polohy, uhlové rýchlosti a pozičné uhly. Vyhodnocovali sa pozorované polohy a jasnosti telies (Šilha a kol., 2009), k čomu nám poslúžili verejný katalóg, doplnkový amatérsky katalóg umelých telies (ďalej amatérsky katalóg) a vlastný program Sateph (Šilha a Tóth, 2009), ktorého vývoj bol súčasťou dizertačnej práce. Spracovanie pozorovaní pomohlo k potvrdeniu správnosti metodiky výpočtu efemeríd umelých telies. Zistili sme, že chyba s akou možno očakávať vypočítané astrometrické polohy by nemala prevyšovať niekoľko oblúkových minút. Táto chyba je tvorená z kombinácie nepresnosti analytického modelu hlavných porúch, ktoré pôsobia na teleso na geocentrickej dráhe (Vallado et al., 2006) a geocentrických dráhových elementov pozorovaného telesa.

### **2.2 Pozorovacia stratégia kozmického smetia**

Na jar 2012 sme uskutočnili štyri noci pozorovaní za účelom získania fotometrie telies kozmického smetia nachádzajúceho sa v geostacionárnej oblasti. Pri týchto pozorovaniach sme využili program Sateph. Fotometrické pozorovania toho istého telesa v rôznych filtroch nám môže poskytnúť informáciu o povrchových vlastnostiach kozmického smetia a teda o jeho pôvode. Pravidelné pozorovania geostacionárnej oblasti americkou NASA a európskou ESA slúžia k mapovaniu populácie kozmického smetia. My sme nadviazali na tento typ pozorovaní, pričom sme sa zamerali na stratégiu pozorovania. Na základe získaných skúseností (Seitzer a kol., 2011) a dostupnej literatúry (Abercromby a kol., 2011;

Schildknecht a kol., 2004) sme navrhli a otestovali túto stratégiu. Keďže telesá na geostacionárnej dráhe sa pohybujú relatívne rýchlo, okolo 15 oblúkových minút za časovú minútu, počas pozorovaní sme vždy vypli hodinový stroj a teleso sa nám tak pri správne vybranej expozičnej dobe javilo ako bod na snímke. V tom prípade sa však referenčné hviezdy javili ako čiary a jasnosti pozorovaných telies sa dajú pri dobrých fotometrických podmienkach získať pomocou štandardných hviezd. My sme takýmto postupom získali informácie o jasnostiach niekoľkých telies, ktoré možno označiť za kozmické smetie. Jednalo sa o nosné rakety, nefunkčné satelity a v jednom prípade o úlomok z rakety. Z pozorovaní sme úspešne otestovali aj náš výpočet astrometrických polôh. Navrhnutá a otestovaná pozorovacia metodika bude využitá na pravidelné pozorovania kozmického smetia na AGO.

### **2.3 Výpočet geocentrických dráhových elementov**

Nami navrhnutý program Sateph je schopný tiež vypočítať geocentrické dráhové elementy pozorovaného telesa. Otestovali sme niekoľko metód na výpočet vektorov polohy a rýchlosti z troch astrometrických polôh a následne výpočet dráhových elementov zo získaných vektorov. Ukázali sme, že s využitím kombinácie metód (Bucerius, 1950; Escobal, 1965; Montenbruck a Gill, 2000) sme schopní takmer vždy získať polohu dráhy v priestore definovanú sklonom k rovníku a dĺžkou výstupného uzla a vo väčšine prípadov aj ostatné geocentrické dráhové elementy. To môže poslúžiť ako predbežný výpočet dráhových elementov počas pozorovaní a tiež ako nápoveda k rozlíšeniu telesa nachádzajúceho sa na geocentrickej dráhe a planétky nachádzajúcej sa na heliocentrickej dráhe.

## **3 Meteory tvorené kozmickým smetím**

Ročne v atmosfére Zeme zanikne priemerne 400 telies kozmického smetia väčších ako 10 cm. Keďže sa tieto telesá nachádzajú na geocentrickej dráhe, ich dynamika vzniku do atmosféry je priamo viazaná na interval rýchlosti od 7,8 km/s do 11,2 km/s. V dizertačnej práci skúmame pravdepodobnosť a frekvenciu s akou by sme boli teoreticky schopní zachytiť meteor vytvorený takýmto typom telies naším celooblohovým video systémom umiestneným na AGO.

### **3.1 Fyzika meteorov a priestorové rozloženie častíc kozmického smetia**

Teleso umiestnené na geocentrickej dráhe podlieha gravitačným a negravitačným poruchám, ktoré ovplyvňujú dynamiku jeho pohybu. Najúčinnejšími poruchami, ktoré aj

vplývajú na životnosť telesa, v prípade že sa nachádza na nízkej dráhe sú trenie s atmosférou a slnečné žiarenie. Skúmali sme koľko častíc väčších ako jeden centimeter zanikne za rok v atmosfére. Použili sme model meteoru navrhnutý Pecinom a Ceplechom (1983) aby sme otestovali, či by naša celooblohová video kamera bola schopná takéto častice pozorovať počas ich preletu atmosférou. Simulácia ukázala, že z dôvodu zenitovej vzdialenosti, s ktorou klesá jasnosť pozorovaného meteoru vzhľadom k pozorovateľovi by sme boli schopní zachytiť približne 30 % meteorov, ktoré by boli v zornom poli našej celooblohovej kamery. Aby sme získali priestorové rozloženie častíc kozmického smetia v blízkom okolí Zeme použili sme modely kozmického smetia NASA ORDEM2000 a ESA MASTER-2005 s MASTER-2009. Keďže slnečná aktivita vplýva na hustotu atmosféry Zeme a tým nepriamo na životnosť telies na nízkych dráhach skúmali sme koľko by ich zaniklo v atmosfére behom konkrétneho roka, od 2000 do 2012. K tomuto účelu sme použili NASA model DAS 2.0, model na predpoveď zmeny geocentrickej dráhy s časom. Model v sebe zahŕňa všetky dôležité poruchy ako nesférickosť gravitačného poľa Zeme, gravitačné poruchy od Slnka a Mesiaca a slnečné žiarenie a jeho tlak.

### **3.2 Detekčná frekvencia**

Naša analýza ukázala, že detekcia meteoru vytvoreného kozmickým smetím je málo pravdepodobná, rádovo niekoľko meteorov za desaťročie pre modely ORDEM2000 a MASTER-2005. Podľa najnovšieho modelu MASTER-2009, ktorý v sebe zahŕňa aj udalosť ako je rozpad čínskeho satelitu Fengyun 1C, by naša celooblohová kamera mohla byť schopná zachytiť jeden meteor za dva roky. Podľa modelu zachytenie takéhoto meteoru je najpravdepodobnejšie v roku 2012, kedy sa blíži maximum v slnečnej aktivite. Pravdepodobnosť bola vypočítaná na 80 %.

## **4 In situ merania uskutočnené na Medzinárodnej vesmírnej stanici**

V roku 2011 sa na oddelení kozmického smetia NASA, Houston, USA uskutočnila analýza dvoch panelov (Šilha, 2011), označovaných tiež ako MMOD (z angl. Meteoroid and Orbital Debris) pôvodne umiestnených na vonkajšej časti Medzinárodnej vesmírnej stanice ISS. Panely boli nainštalované na ISS po dobu 8,5 roka, od júla 2001 do novembra 2009. Počas tohto obdobia dochádzalo k neustálym zrážkam medzi MMOD panelmi a mirometeoroidnými časticami spolu s časticami kozmického smetia. Z tohto dôvodu sa na povrchu oboch panelov, z ktorých každý mal rozlohu o veľkosti 1 m<sup>2</sup>, vytvorilo veľké

množstvo kráterov s rozmermi od mikrometrov po milimetre. Vďaka kráterom a nami nameraným údajom sme boli schopní verifikovať a aktualizovať súčasné meteoroidné modely a modely kozmického smetia určené na mapovanie týchto populácií v blízkom okolí Zeme.

#### **4.1 Fotografovanie a meranie kráterov**

V prvej fáze analýzy MMOD panelov sa vizuálne identifikovali všetky podozrivé štruktúry na povrchu v priemere väčšie ako 100  $\mu\text{m}$ . Jednotlivé štruktúry sa nasnímali elektronickým mikroskopom, pričom sa okrem dvojrozmerných snímok vypracoval aj trojrozmerný obraz pre rozmerovo väčšie krátery. Počas tejto prvotnej fázy na povrchu oboch panelov sa spoločne nasnímalo okolo 400 štruktúr, z toho okolo 70 % kráterov. Po ukončení snímokovania kráterov sa vykonala klasifikácia nájdených štruktúr. Pri kráteroch sme merali ich rozmery, priemer na povrchu, hĺbku krátera a výšku okraja krátera.

#### **4.2 Modelovanie početnosti pomocou dopadov meteoroidov**

Namerané údaje sme následne porovnali s údajmi nameranými na družici LDEF (Long Duration Exposure Facility), kde sme zistili, že nami získaná početnosť kráterov ako aj jej sklon v kumulatívnom zobrazení sa líšia od početností nameraných na družici LDEF. Hlbšou analýzou sme zistili, že dôvod týchto dvoch nezrovnalostí súvisí s umiestnením MMOD panelov na ISS, kde panely boli väčšinou času kryté proti dopadom častíc prichádzajúcich zo smeru pohybu ISS. Na druhej strane, nad MMOD panelmi sa vyše päť rokov nachádzal slnečný panel, ktorý bol primárnym zdrojom vyvrhnutých častíc, z ktorých niektoré zasiahli aj MMOD panely. S využitím najmodernejšieho modelu pre meteoroidy a kozmické smetie ESA MASTER-2009 sme simulovali MMOD panely počas ich celej expozičnej doby. Zaujímali sme sa ako sa líšia nameraná početnosť s modelovanou. Zvlášť sme pristupovali ku meteoroidom a ku časticiam kozmického smetia. Získali sme celkovú početnosť kráterov, ktorú by podľa modelu mohli meteoroidné častice spôsobiť okolo 16,8 kráterov/ $\text{m}^2$ /rok a 5,1 kráterov/ $\text{m}^2$ /rok pre krátery väčšie ako 112  $\mu\text{m}$  a 224  $\mu\text{m}$ . Pri nameraných dátach to bolo okolo 15,7 kráterov/ $\text{m}^2$ /rok a 8,7 pre krátery väčšie ako 112  $\mu\text{m}$  a 224  $\mu\text{m}$ . Početnosť získaná s uvažovaním kozmického smetia dosahovala rádovo dvakrát menšiu hodnotu ako meteoroidné častice, teda táto populácia mala zanedbateľný vplyv na priamu tvorbu nameranej početnosti kráterov.



### 4.3 Modelovanie počtosti pomocou vyvrhnutých častíc zo sekundárnych zdrojov

Aby sme vysvetlili zvýšenú početnosť nameraných kráterov použili sme model pre vyvrhnuté častice (Rival a Mandeville, 1999). Tento model a jeho modifikované verzie (Klinkrad, 2006; Gäde, 2009) slúžia na modelovanie rozdelení veľkostí, rýchlostí a smeru vyvrhnutých častíc po dopade primárnej častice, meteoroidu alebo kozmického smetia na povrch slnečného panela alebo inej externej časti ISS. S uvažovaním vygenerovaných populácií sme modelom MASTER-2009 simulovali pády meteoroidov a kozmického smetia na povrch slnečného panelu umiestneného niekoľko metrov nad MMOD panelmi viac ako 5 rokov. Naša simulácia ukázala, že v kombinácii dopadov meteoroidov a vyvrhnutých častíc vzniknutých na slnečnom paneli po dopade meteoroidov a kozmického smetia vieme dostatočne vysvetliť nami nameranú početnosť, jej veľkosť a aj jej sklon v kumulatívnom zobrazení.

Keďže sme ukázali, že dominantnými zdrojmi počtosti kráterov nameraných na MMOD paneloch sú meteoroidy a vyvrhnuté častice, je možné dané populácie modelovať, ich veľkostné a hmotnostné rozdelenie za predpokladu známych rozdelení dopadových rýchlostí, dopadových uhlov a hustôt (Šilha, 2011).

## 5 Závery

Analýzy prezentované v dizertačnej práci sú venované populácii kozmického smetia, ktorú sme schopní pozorovať prístrojmi na našom observatóriu (AGO). Skúmame tri typy populácii, veľké nefunkčné satelity, nosné rakety a úlomky ktoré možno pozorovať hlavným 0,6-metrovým ďalekohľadom na AGO, menšie centimetrové častice ako trosky z horenia tuhého paliva alebo malé úlomky, ktoré by bolo možné pozorovať našou celooblohou video kamerou určenou na pozorovanie meteorov a mikrometrovými vyvrhnutými časticami, ktoré vznikli po kolízii meteoroidov a kozmického smetia s Medzinárodnou vesmírnou stanicou ISS za posledných desať rokov. Tieto problematiky diskutujeme oddelene v troch kapitolách.

Zisťovali sme možnosť ako rýchlo a efektívne rozoznať družice, nosné rakety alebo iný typ kozmického smetia od blízkozemských planétok, ktoré sa náhodne zachytia počas astronomických pozorovaní. Vyvinuli sme program pre pozorovanie, identifikovanie a výpočet dráhových elementov kozmického smetia. Naprogramovali a otestovali sme procedúry, ktoré sme implementovali nášho programu Sateph, ktorý sme využívali počas pozorovaní kozmického smetia na AGO.

- Použili sme analytický model hlavných porúch ktoré pôsobia na teleso na geocentrickej dráhe (Vallado et al., 2006) a zimplementovali sme ho do nášho programu Sateph. Program je vyvinutý pre pozorovania, identifikáciu a výpočet geocentrických dráhových elementov kozmického smetia. S použitím aktuálnych dráhových elementov program je schopný rýchlo a efektívne identifikovať konkrétne telesá. Náš program Sateph sme využili počas pozorovaní družíc a nosných rakiet za účelom získania presnosti výpočtu efemeríd (Šilha et al., 2009). Ukázali sme, že chyba akú možno očakávať medzi pozorovanými a vypočítanými telesami sa pohybuje rádovo oblúkové minúty za časovú minútu pre telesá na vyšších dráhach ako geostacionárne dráhy.
- Taktiež sme naprogramovali a otestovali metódy na výpočet geocentrických dráhových elementov z malých pozorovacích oblúkov. Spolu sa testovali metódy na výpočet vektorov polohy a rýchlosti a následne elementov z daných vektorov. Zistili sme, že s použitím metód prezentovaných Buceriusom (1950), Escobalom (1965) a Montenbruckom a Gillom (2000), je možné získať v drvivej väčšine polohu dráhy definovanej sklonom a dĺžkou výstupného uzla a vo väčšine prípadov aj ostatné dráhové elementy. Všetky tieto metódy sú implementované v programe Sateph.
- Na jar 2012 sme uskutočnili pozorovaciu prehliadku geostacionárneho prstenca s 0,6-metrovým ďalekohľadom na AGO. Testovali sme pozorovaciu stratégiu ktorá bola založená na pozorovacích prehliadkach kozmického smetia americkou agentúrou NASA (Abercromby a kol., 2011). Túto stratégiu sme modifikovali pre podmienky na našom observatóriu AGO a prezentovali sme výsledky z fotometrických meraní niekoľkých telies, ktoré možno označiť ako kozmické smetie. Nami navrhnutá a otestovaná pozorovacia stratégia bude použitá pre plánované fotometrické pozorovania uskutočnené na AGO za účelom získania vlastnosti povrchových materiálov kozmického smetia, hlavne úlomkov (Cowardin a kol., 2010).
- S použitím programu Sateph sme simulovali frekvenciu detekcie kozmického smetia pomocou plánovaného prehliadkového systému na vyhľadávanie blízkozemských planétok, ktorý sa plánuje vybudovať na AGO. Ukázali sme, že tento systém by mal byť schopný zachytiť od 250 do 450 telies s viac ako dvoma astrometrickými polohami, hlavne družice a nosné rakety v závislosti od

konkrétneho dňa v roku. Získané astrometrické dáta by mohli byť sprostredkované vesmírnym agentúram alebo využité na vlastný výpočet dráhových elementov.

Vo štvrtej kapitole sa venujeme meteorom vzniknutým horením častíc kozmického smetia v atmosfére. Skúmame možnosti zachytenia takéhoto typu meteoru pomocou našej celooblohovej video kamery umiestenej na AGO. K analýze sme využili modely kozmického smetia NASA ORDEM2000 a ESA MASTER-2005 a MASTER-2009, ktoré nám poskytli priestorové rozloženia častíc v blízkom okolí Zeme. Zaujímali sme sa o detekčnú frekvenciu častíc väčších ako jeden centimeter v priemere. Pomocou meteorického modelu navrhnutého Pecinom and Ceplechom (1983) sme overili a ukázali aká je pravdepodobnosť zachytenia takýchto meteorov celooblohovou video kamerou. Skúmali sme rôzne roky, od 2000 do 2012 aby sme pokryli celý slnečný cyklus, počas ktorého sme očakávali rôzne detekčné frekvencie meteorov. Životnosti dráh častíc kozmického smetia, ktoré mohli vytvoriť meteorický jav sme získali pomocou NASA modelu Debris Assessment Model.

- Vypočítali sme, že frekvencia detekcie meteorov vytvorených kozmickým smetím je relatívne nízka, rádovo niekoľko meteorov za desaťročie vzhľadom k modelov ORDEM2000 a MASTER-2005 a jeden meteor za dva roky vzhľadom ku modelu MASTER-2009, ktorý uvažuje aj úlomky zo satelitu Fengyun 1C.
- Podľa modelu MASTER-2009, najväčšia pravdepodobnosť pre zachytenie meteoru celooblohovou kamerou je rok 2012 s 80 % pravdepodobnosťou.

V poslednej kapitole prezentujeme výsledky z analýzy panelov MMOD, ktoré boli umiestnené na vonkajšej časti Medzinárodnej vesmírnej stanice ISS viac ako osem rokov.

- Vyfotografovali a zmerali sme krátery nájdené na ISS paneloch. Získali sme celkovú početnosť kráterov, ktorá môže slúžiť na overenie a vylepšenie súčasných meteoroidných modelov a modelov kozmického smetia. Výsledky sme porovnali s výsledkami získanými z misie družice LDEF.
- Využili sme najnovšiu verziu ESA modelu MASTER-2009 a nami naprogramovaný súčasný model tvorenia vyvrhnutých častíc zo sekundárnych zdrojov (Rival a Mandeville, 1999) aby sme tieto modely verifikovali a taktiež vysvetlili nameranú početnosť kráterov s danou veľkosťou. Naša simulácia ukázala, že s uvažovaním meteoroidov spolu s vyvrhnutými časticami, ktoré vznikli dopadom meteoroidov a kozmického smetia na slnečný panel umiestnený nad MMOD panelmi viac ako päť rokov sme schopní kvantitatívne opísať namerané dáta.

- Údaje získane počas našej analýzou povrchov MMOD panelov môžu byť použité na modelovanie veľkostného a hmotnostného rozdelenia meteoroidnej populácie (Šilha, 2011).
- Modelované a namerané údaje možno využiť k vylepšeniu modelu vyvrhnutých častíc, ktoré vznikli po zrážkach častíc s externou výbavou na ISS, ktorá je a bude aj naďalej hlavným zdrojom takéhoto typu kozmického smetia na nízkych dráhach.

## Referencies

- ABERCROMBY, K.J., SEITZER, P., COWARDIN, H.M., BARKER, E.S., MATNEY, M.J., 2011. Michigan Orbital DEbris Survey Telescope Observations of the Geosynchronous Orbital Debris Environment. *NASA TP-2011-217350*.
- BUCERIUS, H., 1950. Bahnbestimmung als Randwertproblem. *Astronomische Nachrichten* **278**, pp. 193-203.
- COWARDIN, H., SEITZER, P., ABERCROMBY, K., BARKER, E., 2010. Characterization of Orbital Debris Photometric Properties Derived from Laboratory-Based Measurements. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii, September 14-17, 2010* p.E47.
- ESCOBAL, P.R., 1965. Methods of Orbital Determination. Krieger Publishing, Malabar, Florida: Krieger Publishing, 1965. ISBN 978-0882753195.
- GÄDE, A., 2009. ESABASE2/Debris Release 2.0 Technical Description. *Etamax Space GmbH*.
- KLINKRAD, H., 2006. Space Debris : Models and Risk Analysis, *Space Debris*. New York, Springer Verlag, 2006. ISBN 978-3540254485.
- MONTENBRUCK, O., GILL, E., 2000. Satellite orbits – Models, Methods and Applications. SPRINGER VERLAG KG, New York: SPRINGER VERLAG KG. ISBN 978-3540672807.
- PECINA, P., CEPLECHA, Z., 1983. New aspects in single-body meteor physics. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **34**, pp. 102-121.
- RIVAL, M., MANDEVILLE, J.C., 1999. Modeling of Ejecta Produced upon Hypervelocity Impacts. *Space Debris* **1** (1), pp. 45-57.
- SEITZER, P., LEDERER, S., BARKER, E., COWARDIN, H., ABERCROMBY, K., ŠILHA, J., BURKHARDT, A., 2011. A Search For Optically Faint GEO Debris. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii, September 13-16, 2011*.
- SCHILDKNECHT, T., MUSCI, R., PLONER, M., BEUTLER, G., FLURY, W., KUUSELA, J., DE LEON CRUZ, J., DE FATIMA DOMINGUEZ PALMERO, L., 2004. Optical observations of space debris in GEO and in highly-eccentric orbits. *Advances in Space Research* **34** (5), pp. 901-911.

- ŠILHA, J., TÓTH, J., KORNOŠ, L., GAJDOŠ, Š., 2009. Pozorovanie umelých telies na observatóriu AGO FMFI UK v Modre. *Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV* **30**, s. 17-25.
- ŠILHA, J., TÓTH, J., 2009. Program SatEph, výpočet efemeríd umelých telies. *Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV* **30**, s. 32-34.
- ŠILHA, J., 2011. Modelovanie meteoroidných častíc pomocou in-situ meraní uskutočnených na ISS. *Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV* **32**, s. 71-84.
- TÓTH, J., KORNOŠ, L., VEREŠ, P., ŠILHA, J., KALMANČOK, D., ZIGO, P., VILÁGI, J., 2011. All-Sky Video Orbits of Lyrids 2009. *Publications of the Astronomical Society of Japan* **63** (2), pp. 331-334.
- VALLADO, D.A., CRAWFORD, P., HUJSAK, R., KELSO, T.S., 2006. Revisiting Spacetrack Report #3, in: *The AIAAAS Astrodynamics Specialist Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1-88.

## Zoznam publikácií

### ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 Tóth, Juraj 40% - Kornoš, Leonard 20% - Vereš, Peter 10% - Šilha, Jiří 5% - Kalmančok, Dušan 10% - Zigo, Pavol 10% - Világi, Jozef 5%: All-sky video orbits of lyrids 2009  
Lit. 9 zázň.  
In: Publications of the Astronomical Society of Japan. - Vol. 63, No. 2 (2011), s. 331-334

### AED Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

AED01 Šilha, Jiří 50 % - Tóth, Juraj 50 %: Rozlíšenie prirodzených a umelých telies v blízkom okolí Zeme  
Lit. 17 zázň.  
In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 29. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť, 2008. - S. 60-72

AED02 Šilha, Jiří 50 % - Tóth, Juraj 20 % - Gajdoš, Štefan 10 % - Piffel, Roman - Majchrovič, Ivan - Világi, Jozef 10 %: Identifikácia dvoch neznámych rýchlych objektov na oblohe  
Lit. 4 zázň.  
In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 29. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť, 2008. - S. 95-100

AED03 Šilha, Jiří 50 % - Tóth, Juraj 50 %: Program SatEph, výpočet efemeríd umelých telies  
Lit. 5 zázň.  
In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 30. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť, 2009. - S. 32-34

AED04 Šilha, Jiří 25 % - Tóth, Juraj 25 % - Kornoš, Leonard 25 % - Gajdoš, Štefan 25 %: Pozorovanie umelých telies na observatóriu AGO FMFI UK v Modre  
Lit. 7 zázň.  
In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 30. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť, 2009. - S. 17-25

AED05 Kornoš, Leonard 30 % - Tóth, Juraj 30 % - Vereš, Peter 10 % - Šilha, Jiří 5 % - Kalmančok, Dušan 10 % - Zigo, Pavol 10 % - Világi, Jozef 5 %: Dvojstaničné Lyridy 2009  
Lit. 11 zázň.  
In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 31. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť, 2010. - S. 9-16

AED06 Šilha, Jiří 100%: Modelovanie meteoroidných častíc pomocou in-situ meraní uskutočnených na ISS  
Lit. 11 zázň.  
In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 32. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť pri SAV, 2011. - S. 71-84

## **Abstract**

Dissertation is dedicated to problematics of space debris population. We are presenting our methodology how to observe, identify and model this kind of population. By using the current dynamical models for geocentric motion (Vallado et al., 2006) and recent orbital elements, we observed several rocket bodies and satellites to get accuracy of the methodology. We have also tested several methods for the geocentric orbit determination from short observation arcs. We found out that by using methods proposed by (Bucerius, 1950; Escobal, 1965; Montenbruck & Gill, 2000) one is able to get with a high probability the orbital inclination and right ascension of the ascending node and in most cases also other orbital elements of the observed object. Based on the NASA space debris observation strategy (Abercromby et al., 2011), we performed several geostationary objects surveys to get photometry of space debris objects by using standard stars. As we present, this strategy showed to be sufficient for future space debris campaigns performed at our observatory.

We were also investigating possibility of tracking meteor phenomena produced by space debris particles with our all-sky video cameras dedicated to meteor observations. We were interested in particles with diameter of 1 cm and larger and their decayed rate per year. We used meteor model of Pecina and Ceplecha (1983). We investigated period 2000-2012 to cover whole solar cycle. The orbital lifetimes of potential meteor particles were obtained by NASA Debris Assessment Software. We have calculated that the detection rate of the “artificial” meteors would be relatively very low, according to space debris models ORDEM and MASTER of the order of few meteors per decade.

In the last chapter we present results from the surface inspection of the panels which were installed on the external part of the International Space Station (ISS). We photographed and measured the impact craters found on the panels to get the total crater flux. This flux can be used to verify and to update the present meteoroid and space debris models. We used ESA newest model MASTER-2009 and current ejecta model (Rival & Mandeville, 1999). Our simulations showed that by assuming the meteoroid population together with the ejecta created by impacts of meteoroids and space debris on the ISS external hardware, we are able to satisfactorily describe the origin of the measured crater flux.

**Key words:** space debris, photometry, artificial meteors, in-situ measurements