

Sjaj meteora pri standardnoj ablaciji

Numeričkom simulacijom modelirano je kretanje meteoroida kroz atmosferu i sjaj meteora pri standardnoj ablaciji u okviru elementarne fizičke teorije meteora. Krive sjaja meteora dobijene su za različite početne vrednosti brzina, masa, gustina i zenitnih daljina radijanata meteoroida. Nađene su funkcije koje opisuju maksimalni sjaj i visinu meteora pri maksimumu sjaja u zavisnosti od početnih parametara. Analizom posmatračkih podataka uz pomoć ovih funkcija su za različite meteorske rojeve, dobijene realistične vrednosti gustina meteoroida. Model nije primenljiv za meteoroidne čije su brzine manje od 16 km/s.

Uvod

Fizička teorija meteora opisuje pojave koje nastaju kao posledica interakcije meteoroida sa atmosferom kroz koju se kreće. To je fenomenološka teorija koja daje vezu između fizičkih parametara meteoroida i veličina koje karakterišu zračenje meteora, kao i vremenski prikaz pojave. Teorija koja ovu pojavu opisuje samo na makroskopskom nivou i ne razmatra mikroskopsku prirodu procesa zove se elementarna fizička teorija meteora. Ona posmatra proces interakcije meteoroida sa atmosferom kao fluidom, kroz razmenu impulsa i energije i na osnovu toga opisuje procese usporjenja, ablacije, zračenja i jonizacije.

Elementarna fizička teorija meteora

Dolazeći iz međuplanetarne sredine, meteoroid mase m kreće se brzinom v (koja se, pod pretpostavkom da pripada Sunčevom sistemu, kreće u opsegu između 11.2 i 72.8 km/s, kao geocentrična brzina), ima impuls p i kinetičku energiju E_k . Do promene ovih parametara dolazi usled interakcije sa Zemljinom atmosferom. Gledano sa aspekta razmene impulsa, gubitak impulsa meteoroida proporcionalan je priraštaju impulsa atmosfere, na osnovu čega se dobija Whipple-ova jednačina usporjenja meteoroida, koja zapravo predstavlja II Njutnov zakon za kretanje meteoroida kroz atmosferu:

*Dušan Pavlović (1990),
Kuršumlija, Toplička
31/19, učenik 4. razreda
Gimnazije u Kuršumliji*

*MENTOR:
Igor Smolić, Institut za
fiziku, Beograd*

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma A m_m^{-\frac{1}{3}} \rho_m^{-\frac{2}{3}} \rho_a v^2 \quad (1)$$

gde je v – brzina, t – vreme, m_m – masa meteoroida, ρ_m – gustina meteoroida, ρ_a – gustina atmosfere. Koeficijent Γ izražava udeo impulsa koji meteoroid predaje atmosferi, a A je koeficijent forme. U našem radu za koeficijent Γ uzeta je vrednost 1, dok je oblik meteoroida aproksimiran sferom, pa je vrednost koeficijenta A 1.21.

Kinetička energija meteoroida odgovorna je za zagrevanje, ablaciju, zračenje i jonizaciju, odnosno sve procese koji čine meteorsku pojavu. Ablacija predstavlja gubitak mase meteoroida tokom prolaska kroz atmosferu. Bez obzira na prirodu ovog procesa može se uzeti da je ablatovana masa proporcionalna kinetičkoj energiji predatoj česticama atmosfere. Na osnovu ove pretpostavke dobija se sledeća jednačina:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{\Lambda A}{2Z} m_m^{\frac{2}{3}} \rho_m^{-\frac{2}{3}} \rho_a v^3 \quad (2)$$

gde je Λ – koeficijent prenosa toplote (izražava udeo kinetičke energije meteoroida koji troši na ablaciju) i Z – specifična toplota ablacije (količina toplote potrebna da se ablatuje jedinica mase meteoroida). U našem radu su za vrednosti ovih koeficijenata korišćene vrednosti iz rada Rogers *et al.* (2005). Za koeficijent prenosa toplote uzeta je vrednost $\Lambda = 1$, a za specifičnu toplotu ablacije vrednost $Z = 6 \cdot 10^6$ J/kg.

Zračenje meteora nastaje pri ekscitaciji atoma (molekula) koja je prouzrokovana sudarima ablatovane materije meteoroida i čestica atmosfere. Energija zračenja je proporcionalna gubitku kinetičke energije meteoroida. Pod pretpostavkom da se tokom pojave brzina meteoroida ne menja značajno, dobija se jednostavna relacija:

$$I = \tau \frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

gde je I – intenzitet zračenja, a τ – koeficijent sjaja (izražava udeo kinetičke energije meteoroida koja se troši na zračenje). Uvođenjem jednačine (2) u (3), jednačina zračenja se može napisati i u obliku:

$$I = -\frac{\Lambda A \tau}{4Z} m_m^{\frac{2}{3}} \rho_m^{-\frac{2}{3}} \rho_a v^5 \quad (4)$$

Elementarna fizička teorija meteora (kao i slični modeli nastali na osnovu nje) odlikuje se svojom izuzetnom jednostavnošću, pošto ne zalazi u složenu prirodu pojave, već počiva na osnovnim zakonima održanja. Međutim, za bilo kakve primene na opisivanje realnih pojava, neophodno je da se odrede vrednosti koeficijenata i parametara koji figurišu u jednačinama ovog modela. Analitičko rešenje realne pojave

nije moguće, pa se za opisivanje meteorskih pojava na osnovu ovih jednačina i odgovarajućih empirijskih podataka prave numerički modeli.

Problem istraživanja

U našem radu, jednačine elementarne fizičke teorije meteora rešene su numeričkom simulacijom. Pri tome je zavisnost gustine atmosfere od visine modelirana u skladu sa empirijskim podacima za realnu atmosferu. Takođe, koristeći novije modele (Hill *et al.* 2005), odredili smo i zavisnost koeficijenta sjaja od brzine meteora. Kretanje meteoroida kroz atmosferu analizirano je u širokom opsegu početnih parametara, na osnovu čega su dobijene vrednosti maksimalnog intenziteta zračenja i vrednosti visine meteora u tom trenutku.

Na osnovu ranijih istraživanja (Rubio 1994), pretpostavili smo da se maksimalni intenzitet zračenja meteora može predstaviti kao stepena funkcija početnih parametara (mase, brzine, zenitne daljine i gustine) meteoroida. Funkcijom istog oblika opisana je i zavisnost visine meteora u maksimumu sjaja od početnih parametara. Parametri ovih funkcija određeni su na osnovu rezultata simulacije, za opseg magnituda koje mogu da se detektuju vizuelnim posmatranjima.

Na osnovu toga nađena je zavisnost visine meteoroida u maksimumu sjaja od brzine, gustine, zenitne daljine meteoroida i prividne magnituda meteora. Iz ove funkcije određena je gustina meteoroida kao funkcija brzine, zenitne daljine, prividne magnituda i visine meteora u maksimumu sjaja. Primenom dobijene funkcije gustine na podatke dobijene iz fotografskih posmatranja meteora Čeških astronoma (Koten *et al.* 2004), koji su analizirali visine meteora pri maksimalnom sjaju, izračunali smo gustine meteoroida za Leonide, Orionide, Perseide, Tauride i Geminide i uporedili sa podacima dobijenim u drugim istraživanjima.

Koeficijent sjaja

Kao što je rečeno, koeficijent sjaja τ izražava udeo kinetičke energije meteoroida koji se troši na zračenje. U osnovi, on se može opisati kao funkcija brzine, mase i sastava meteoroida, koja se određuje na osnovu empirijskih podataka. Jednostavniji modeli uzimaju u obzir samo zavisnost od brzine, pod pretpostavkom da se ta zavisnost može predstaviti stepenom funkcijom (McKinley 1961). U najjednostavnijem slučaju, kada τ linearno zavisi od v , model je primenljiv jedino na neke sjajne fotografske meteore. U našem radu korišćen je noviji model (Hill *et al.* 2005) gde je koeficijent sjaja izražen preko formule:

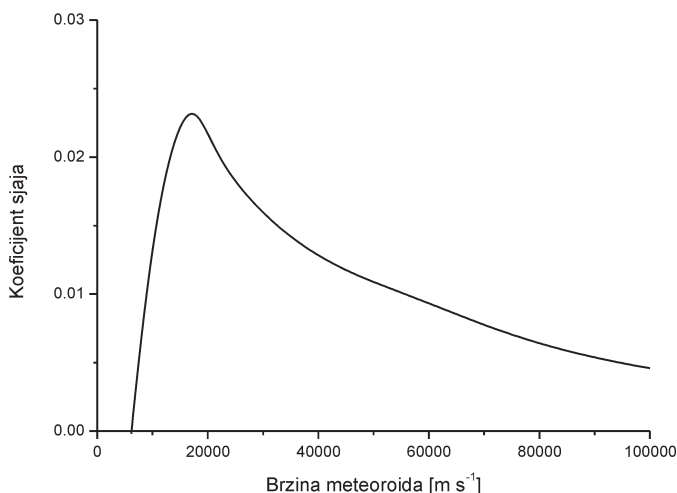
$$\tau = 2 \cdot \frac{\varepsilon}{\mu} \cdot \frac{\zeta}{v^2}$$

gde je ζ – koeficijent ekscitacije, ε – srednja energija ekscitacije, a μ – srednja atomska masa ablatovanog materijala.

U radu Hilla i saradnika (2005), vrednost odnosa ε/μ određena je empirijski, analizom meteorskih spektara i iznosi $7.668 \cdot 10^6$ J/kg. Takođe, za različite opsege brzina određene su i funkcije koje opisuju zavisnost ζ od brzine v . Na osnovu tih funkcija u našem radu je, fitovanjem racionalnim polinomom šestog stepena, određen odnos ζ/v^2 kao jedna funkcija i dobijena je poluempirijska formula za koeficijent sjaja:

$$\tau = 2 \cdot \frac{\varepsilon}{\mu} \cdot \frac{\sum_{i=0}^6 a_i v^i}{\sum_{i=0}^6 b_i v^i} \quad (5)$$

Dobijeni izraz je primenljiv za brzine iz opsega od 6.2 do 100 km/s. Grafik funkcije (5) prikazan je na slici 1, a vrednosti koeficijenata fita dati su u tabeli 1.



Slika 1.
Koficijent sjaja u zavisnosti od brzine meteoroida

Figure 1.
Luminous efficiency factor as a function of meteoroid velocity

Tabela 1. Vrednosti koeficijenata dobijenih fitovanjem funkcije (5) za koeficijent sjaja τ , kada je brzina izražena u km/s

a_0	-0.00136581	b_0	1
a_1	$4.00331430 \times 10^{-4}$	b_1	-0.19391068
a_2	$-3.83792332 \times 10^{-5}$	b_2	0.02036594
a_3	$1.60524233 \times 10^{-6}$	b_3	-0.00130047
a_4	$-2.99532621 \times 10^{-8}$	b_4	$4.58046715 \times 10^{-5}$
a_5	$2.40521659 \times 10^{-10}$	b_5	$-7.50545359 \times 10^{-7}$
a_6	$-4.42555520 \times 10^{-13}$	b_6	$4.80068343 \times 10^{-9}$

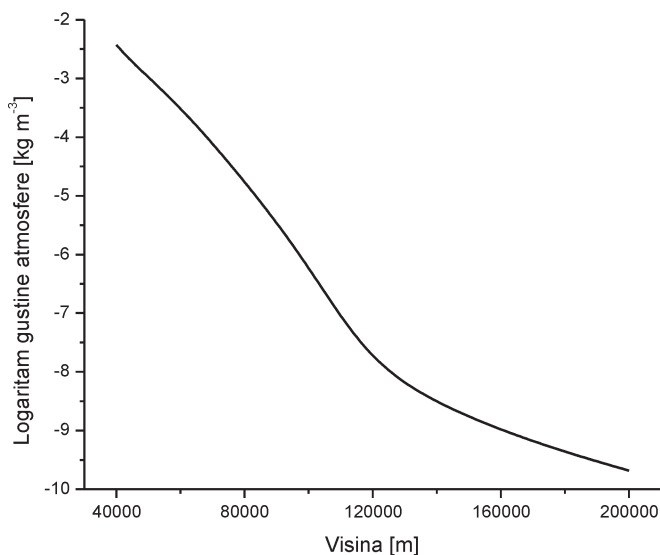
Model atmosfere

U procesu ablacije gustina atmosfere igra veoma važnu ulogu i zbog toga je potrebno koristiti što realniji model atmosfere. Najjednostavniji model predstavlja zavisnost gustine atmosfere od visine po barometarskoj formuli (Babadzhanov 1987). U našem radu je korišćen model realne atmosfere koji daje diskretne empirijske vrednosti gustine atmosfere date u bazi MSIS-E-90 (Hedin 1987, 1991). Vrednosti gustine atmosfere variraju u zavisnosti od doba dana i godine, i zavise od geografske širine i dužine, kao i od aktivnosti Sunca. U našem radu su za gustinu atmosfere uzete vrednosti koje odgovaraju atmosferi pri srednjoj aktivnosti Sunca (1. april 2005. godine u 00:00 h po lokalnom vremenu) na geografskoj dužini 45° E i geografskoj širini 45° N.

Korišćeni su podaci o atmosferi na visinama do 220 km, na svakih 1.5 km. Na osnovu njih, na opsegu od 40 do 220 km, fitovanjem jednačine za logaritam gustine atmosfere racionalnim polinomom šestog stepena, dobijena je jednačina za računanje gustine atmosfere:

$$\rho_a = \exp\left(\frac{\sum_{i=0}^6 c_i v^i}{\sum_{i=0}^6 d_i v^i}\right) \quad (6)$$

Vrednosti koeficijenata fita date su u tabeli 2, a zavisnost logaritma gustine atmosfere od visine prikazana je na slici 2. Korišćena je aproksimacija planparalelne atmosfere, što nije davalo mogućnost istraživanja meteora velikih zenitnih daljina.



Slika 2.
Profil gustine atmosfere u zavisnosti od visine

Figure 2.
Logarithm of atmospheric mass density as a function of height

Tabela 2. Vrednosti koeficijenata dobijenih fitovanjem funkcije (6) za gustinu atmosfere ρ_a , kada je visina izražena u km

c_0	948.41141663	d_0	1
c_1	-101.34964912	d_1	2.03320981
c_2	3.47957427	d_2	-0.07603932
c_3	-0.06317524	d_3	0.00146335
c_4	$6.23641650 \times 10^{-4}$	d_4	$-1.56226711 \times 10^{-5}$
c_5	$-3.08507828 \times 10^{-6}$	d_5	$8.32332896 \times 10^{-8}$
c_6	$5.79295724 \times 10^{-9}$	d_6	$-1.65121236 \times 10^{-10}$

Numerički model meteora

Simulacija se zasniva se na jednačinama kretanja datim elementarnom fizičkom teorijom. Pod pretpostavkom da se brzina meteoroida ne menja, u ovom numeričkom modelu te jednačine su rešene i dobijen je prikaz meteora kroz promenu intenziteta zračenja u vremenu. Koeficijent sjaja je predstavljen kao funkcija brzine (5), a gustina atmosfere kao funkcija visine (6). U skladu sa tim, priraštaj visine meteoroida zavisi od brzine v i od zenitnog ugla z_r pod kojim on ulazi u atmosferu, što se može izraziti jednačinom:

$$\frac{dh}{dt} = -v \cos z_r \quad (7)$$

gde je h – visina meteoroida, a z_r – zenitna daljina radijanta.

Sistem diferencijalnih jednačina (1), (2) i (7), numerički je rešen Runge-Kutta metodom četvrtog reda sa konstantnim korakom integracije. Kôd je napisan u programskom jeziku C, na Linux platformi i sastoji se iz dva dela. Prvi deo, generator meteoroida, dodeljuje različite vrednosti brzine, mase, zenitne daljine radijanta i gustine meteoroidu, čije se jednačine kretanja rešavaju u drugom delu programa, koji predstavlja Runge-Kutta integrator. Na osnovu trenutnih vrednosti navedenih parametara u svakom koraku integracije se računa intenzitet zračenja.

Nakon preliminarne analize zaključeno je koji opseg i kakva inkrementacija ulaznih parametara treba da se koristi u generatoru meteoroida. Korak inkrementacije je odabran tako da razlika apsolutnih magnituda za dva „susedna“ meteoroida bude manja od 0.2^m . Generator meteoroida kreira početne parametre meteoroida po sledećoj šemi:

$$\begin{aligned} v(n+1) &= v(n) \cdot 10^{0.032} \\ m(n+1) &= m(n) \cdot 10^{0.08} \\ \cos z_r(n+1) &= \cos z_r(n) \cdot 10^{0.032} \\ \rho(n+1) &= \rho(n) \cdot 10^{0.1} \end{aligned} \quad (8)$$

Početne mase meteoroida koji su analizirani kreću se u opsegu od 10^{-8} do $10^{-1.5}$ kg, brzine od 11.2 do 72.8 km/s, zenitne daljine radijanta od 0 do 80° , i gustina meteoroida od 300 do 3000 kg/m³, koji obuhvata meteoroidne različitog porekla. Na osnovu inkrementacije ovih veličina u generatoru meteoroida, koja se obavlja po zakonu (8), dobija se 234 520 meteoroida.

Pošto su predmet istraživanja meteori koji se mogu detektovati vizuelnim posmatranjima, opseg koji je dobijen na osnovu ulaznih parametara iz početka analize redukovan je na opseg između -6.5^m i 6.5^m apsolutnog sjaja (što odgovara realnom apsolutnom sjaju koji može da se detektuje). To daje 147 221 meteor. U opsegu od -6.5^m i 6.5^m prividnog sjaja dobija se ukupno 134 833 meteora.

Intenzitet zračenja meteora pretvoren je u fotometrijske veličine sjaja – magnitude. Jednačina pomoću koje se ova konverzija vrši izvedena je iz Pogsonovog zakona, za zračenje u 4π steradiana prostornog ugla, na talasnoj dužini od 555 nm, uz uračunavanje uticaja atmosferske enkstinkcije na zračenje, i glasi:

$$M = -14.8 - 1.5 \log \frac{683I}{4\pi d^2}$$

gde je I – intenzitet zračenja u vatima, a d – udaljenost do meteora. Apsolutne magnitude su računane za udaljenost $d = 100$ km, a prividne za pravu udaljenosti meteora.

Zbog optimizacije i veće tačnosti, korak integracije je usaglašen sa vrednostima početnih parametara meteoroida i određen formulom

$$dt = dt_0 \frac{72800}{v \cos z_r},$$

gde je dt_0 – početni korak koji predstavlja minimalni korak integracije kada je zenitna daljina radijanta 0° a brzina meteoroida 72.8 km/s. Njegova vrednost iznosi 0.0001 s. Po ovoj formuli korak promene visine je isti za bilo koje početne uslove i iznosi 7.28 m.

Postoje dva kriterijuma pri kojima se integracija završava. U prvom slučaju, kada vrednost mase meteoroida spadne na 10^{-4} deo početne mase, integracija je uspešno završena. Po drugom kriterijumu proces integracije se prekida i proglašava neuspešnim ako se vrednost intenziteta zračenja poveća dva ili više puta u jednom koraku integracije, kada visina meteoroida ima vrednosti manje od 130 km. U ovom slučaju, elementarna fizička teorija meteora korišćena u našem radu ne opisuje dobro kretanje meteoroida malih masa (10^{-8} kg), malih brzina (manjih od 16 km/s) i malih gustinama (manjih od 1 g/cm³). U proseku, svaka uspešna integracija se sastoji od 15 000 koraka. Početna visina za sve meteoroidne je 200 km,

dok se koeficijent sjaja i gustina atmosfere računaju u svakom koraku integracije.

Pri određivanju maksimalnog sjaja, u svakom koraku integracije dobijena vrednost se poredi sa prethodnom i pamtí ona koja je veća. Pored ostalih parametara (brzina, masa, visina, ubrzanje, koeficijent sjaja, vreme, gustina atmosfere) pri maksimumu sjaja, intenzitet zračenja meteora je glavni izlazni podatak integratora. Izražen kao stepena funkcija mase, brzine, zenitne daljine radijanta i gustine (Rubio 1994), on predstavlja funkciju na osnovu koje se može doći do maksimalnog intenziteta zračenja za bilo koje ulazne parametre. Može se zapisati kao:

$$I_{\max} = K v^{k_v} m_m^{k_m} \cos^{k_z} z_r \rho_m^{k_\rho}$$

Logaritmovanjem, ovaj oblik se transformiše u linearnu kombinaciju:

$$\log I_{\max} = \log K + k_v \log v + k_m \log m_m + k_z \log \cos z_r + k_\rho \log \rho_m \quad (9)$$

Koeficijenti k_v , k_m , k_z i k_ρ karakterišu zavisnost intenziteta zračenja od ulaznih parametara i dobijaju se fitovanjem metodom višestruke linearne regresije. Naročito je važan koeficijent k_m , koji karakteriše zavisnost intenziteta zračenja od mase meteoroida, na osnovu koje se mogu vršiti dalja istraživanja meteorskih rojeva u pogledu populacionog indeksa, masenog indeksa i numeričke gustine roja.

Nakon preliminarne analize, u našem radu je pretpostavljeno da i visina meteoroida u maksimumu zračenja može da se predstavi kao slična linearna kombinacija:

$$H_{\max} = \log J + j_v \log v + j_m \log m_m + j_z \log \cos z_r + j_\rho \log \rho_m \quad (10)$$

Metodom višestruke linearne regresije dobijaju se koeficijenti fita, na osnovu kojih se mogu izvesti zaključci o tome kako visina meteoroida pri maksimumu zračenja zavisi od početnih parametara – mase, brzine, zenitne daljine i gustine meteoroida. Na osnovu te funkcije, može se zaključiti kolike su promene početnih parametara meteoroida potrebne da bi se visina promenila za neku određenu vrednost. Sve funkcije su fitovane u programu Origin Pro 8.0.

Takođe, na osnovu istraživanja na temu visina Leonida, Orionida, Perseida, Taurida i Geminida (Koten *et al.* 2004), iz podataka za visine meteoroida pri maksimumu sjaja, određenih sa video snimaka, u našem radu je pretpostavljeno da se visina meteoroida pri maksimumu sjaja može predstaviti i funkcijom:

$$H_{\max} = \log L + l_v \log v + l_z \log \cos z_r + l_\rho \log \rho_m + l_M M_{\text{app}}, \quad (11)$$

gde je M_{app} prividna magnituda meteora.

Na osnovu izlaznih podataka integratora za meteore čija se vrednost maksimalnog prividnog sjaja nalazi u opsegu od -6.5^m i 6.5^m mogu se odrediti koeficijenti fita. Nakon toga, za poznate vrednosti visine, brzine, zenitne daljine radijanta i prividne magnitude, mogu se odrediti gustine meteoroida. Koristeći rezultate istraživanja Kotena i saradnika (Koten *et al.* 2004), pod pretpostavkom da je srednja magnituda meteora koje su snimili 2^m i da su svi meteori posmatrani pod uglom od 45° , za određene brzine i zenitne daljine radijanta, mogu se odrediti gustine rojeva koje su posmatrali.

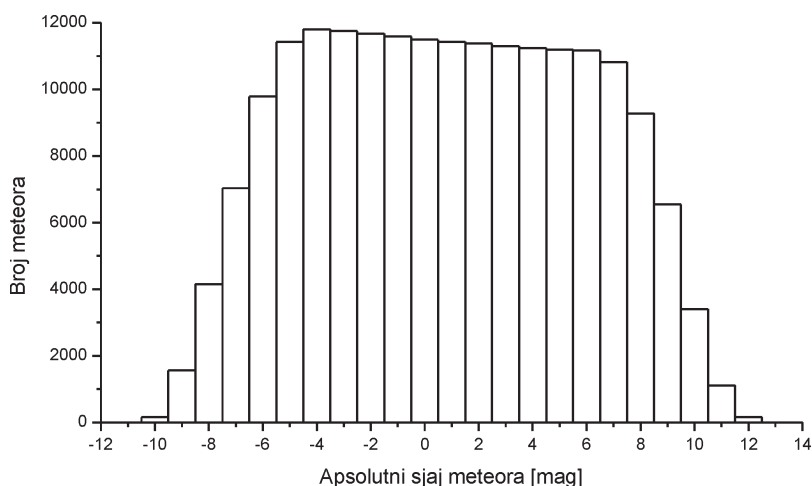
Nakon ovako određenih gustina, one se mogu uporediti sa istraživanjima koja se na drugi način bave određivanjem gustina čestica meteoroida (Rubio *et al.* 2002).

Rezultati simulacije

Integraciju je uspešno završilo 191 527 meteoroida. Na osnovu ovog broja meteoroida, napravljena je raspodela broja meteora po apsolutnom sjaju u magnitudama, koja je prikazana na slici 3.

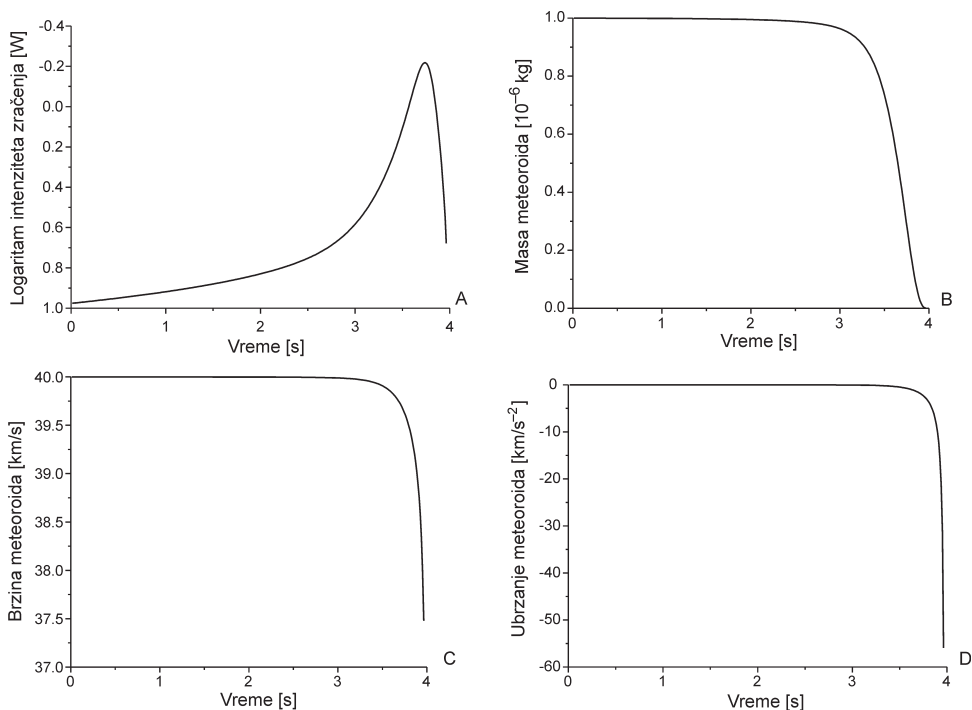
Treba naglasiti da je na osnovu rezultata integracije, u kojima ima znatno manje meteora malih brzina u odnosu na sve ostale, izveden zaključak da model korišćen u radu ne opisuje dobro ablaciju meteoroida brzina manjih od 16 km/s.

Kao primer funkcionisanja elementarne fizičke teorije meteora, na slici 4 su prikazani profili promena fizičkih parametara tipičnog meteoroida pri kretanju kroz Zemljinu atmosferu. Uzeto je da je masa meteoroida 10^{-5} kg, brzina 40 km/s, gustina 1 g/cm^3 , a zenitna daljina radijanta 45°



Slika 3.
Raspodela broja meteora po apsolutnom sjaju u magnitudama, u maksimumu zračenja

Figure 3.
Distribution of number of meteors due to absolute brightness in magnitudes, for maximum meteor luminosity



Slika 4. Primer zavisnosti fizičkih parametara meteora od vremena, za meteoroid mase 10^{-5} kg, brzine 40 km/s, gustine 1 g/cm^3 i zenitne daljine radijanta 45° . A) zavisnost mase meteoroida od vremena, B) zavisnost brzine meteoroida od vremena, C) zavisnost ubrzanja meteoroida od vremena, D) zavisnost logaritma intenziteta zračenja meteora od vremena.

Figure 4. An example of dependencies of physical parameters of meteors with time, for meteoroids with mass 10^{-5} kg, velocity 40 km/s, mass density 1 g/cm^3 and zenith angle 45° . A) meteoroid mass dependance of time, B) meteoroid velocity dependance of time, C) meteoroid acceleration dependance of time, D) logarithm of meteor light intensity dependance of time.

Na osnovu ovog modela, dobijene su vrednosti parametara meteoroida u maksimumu zračenja, kao i intenzitet zračenja i visinu meteora, na osnovu kojih su fitovane funkcije (9) i (10). Koeficijenti dobijeni fitovanjem funkcije (9) prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti koeficijenata u jednačini (9) za računanje maksimalnog intenziteta zračenja meteora

Koeficijent	Vrednost	Greška
$\log K$	-3.319	0.003
k_v	2.3392	0.0007
k_m	1.00405	0.00009
k_z	1.0134	0.0006
k_ρ	0.0122	0.0004

U ovom fitu, standardna devijacija za logaritam intenziteta zračenja iznosi 0.051, odnosno 0.13^m . Može se zaključiti da najveći uticaj na promenu intenziteta zračenja meteora ima brzina meteoroida, a gustina meteoroida utiče zanemarljivo malo.

Vrednosti koeficijenata u jednačini (9) dobijeni su na osnovu apsolutne magnitude meteora u maksimumu sjaja koja je dobijena preko Pogsonovog zakona: $\log K = 8.297$, $k_v = -5.85$, $k_m = -2.51$, $k_z = -2.53$ i $k_p = -0.03$. Upoređivanjem ovih rezultata sa vrednostima koje je dobio Rubio (1995), zaključuje se da jedino vrednost koeficijenta k_v značajno odstupa od vrednosti koje je on dobio. Vrednost ovog koeficijenta je za 2.9 manja od vrednosti dobijene u pomenutom radu. Vrednosti koeficijenta k_m se razlikuju za 0.26, a vrednosti koeficijenta k_z za 0.94. Treba napomenuti da Rubio nije eksplicitno razmatrao magnitude od gustine meteoroida.

Koeficijenti fita funkcije (10) dati su u tabeli 4. Standardna devijacija iznosi 400 m.

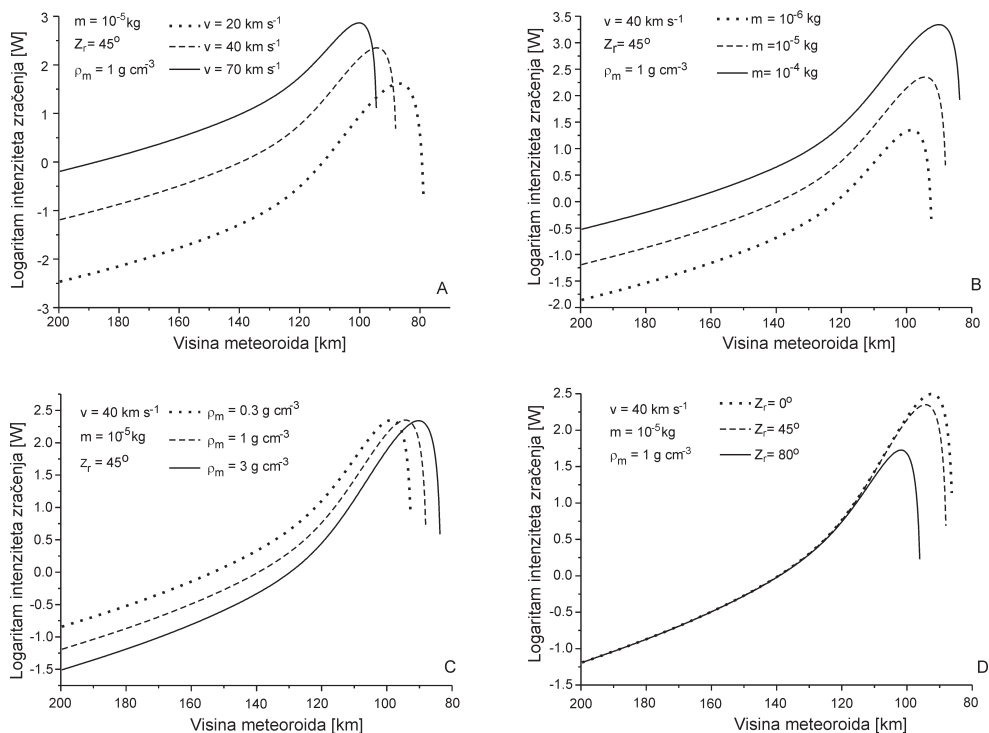
Tabela 4. Vrednosti koeficijenata u jednačini (10) za računanje visine meteoroida u maksimumu zračenja

Koeficijent	Vrednost	Greška
$\log J$	-19070	30
j_v	25180	6
j_m	-4382.9	0.7
j_z	-13274	5
j_p	-8849	3

Gruba grafička interpretacija rezultata ova dva fita je prikazana na slici 5, gde su prikazane zavisnosti logaritma intenziteta zračenja meteora od visine meteoroida za različite konfiguracije početnih fizičkih parametara (brzine, mase, zenitne daljine i gustine). Na svakom grafiku su varirane vrednosti samo jednog parametra.

Metodom višestruke linearne regresije fitovana je funkcija (11) za opseg prividnih magnituda od -6.5^m do 6.5^m . Standardna devijacija iznosi 350 m, a dobijeni koeficijenti prikazani su u tabeli 5.

Uz pomoć tako dobijene funkcije, za pretpostavljenu srednju prividnu magnitudu 2^m , dobijene su vrednosti gustina meteoroida za Leonide, Orionide, Perseide, Tauride i Geminide. Podaci o visinama, kao i o ostalim parametrima meteora, uzeti su iz literature (Koten *et al.* 2004), na osnovu čega su, za pomenute rojeve određene gustine prikazane u tabeli 6. Dobijene vrednosti su upoređene sa vrednostima koje su dobili Rubio i saradnici (2002) za meteore snimljene video kamerama. Njihovi rezultati pokazuju da se vrednosti gustina razlikuju za meteoroidne asteroidnog i



Slika 5. Zavisnost logaritma intenziteta zračenja meteora od visine meteoroida za meteoroidne različite upadnih parametara. A) za različite vrednosti početnih brzina, B) za različite vrednosti početne mase, C) za različite vrednosti početne zenitne daljine, D) za različite vrednosti gustine meteoroida,

Figure 5. Logarithm of light intensity of meteor as a function of meteor height for meteoroids with different initial parameters. A) for different values of initial velocities, B) for different values of initial mass, C) for different values of initial zenith angle, D) for different values of meteoroid density.

meteoroidne kometnog porekla. Dobili su da prosečna gustina za meteoroidne asteroidnog porekla (Geminide i Kvadrantide) iznosi 1400 kg/m^3 , dok je za meteoroidne kometnog porekla vrednost gustine 3–4 puta manja.

Tabela 5. Vrednosti koeficijenata fita funkcije (11) za računanje visine meteora pri maksimumu sjaja određenog na osnovu video podataka (prema Kōten *et al.* 2004)

Koeficijent	Vrednost	Greška
$\log L$	-40500	30
l_v	34004	5
l_z	-8483	4
l_ρ	-8433	3
l_M	1679.6	0.3

Tabela 6. Izračunate vrednosti gustina meteoroida analiziranih meteorskih rojeva

Roj	H_{\max} [km]	v [km/s]	z_r [°]	ρ_m [kg/m ³]
Leonidi	106.9	70.7	44.2	416.51
Orionidi	106.7	66.4	42.7	333.13
Perseidi	104.4	59.6	42.7	403.79
Tauridi	92.7	28.0	37.3	432.53
Geminidi	91.7	34.4	32.2	1224.88

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 6, u našem radu je zaključeno da meteoroidi asteroidnog porekla imaju 3–4 puta veću gustinu od meteoroida kometnog porekla. U ovom slučaju, Geminidi se jedini izdvajaju kao meteoroidi asteroidnog porekla, dok meteoroidi iz ostalih rojeva imaju manju gustinu. Naši rezultati se u ovoj meri poklapaju sa rezultatima istraživanja Rubio i saradnika (2002), što govori da su ove gustine realistične i model koji je korišćen u ovom radu dobro opisuje procese pri kretanju meteoroida kroz atmosferu.

Zaključak

Određene su funkcije koje izražavaju intenzitet zračenja meteora i visinu meteora u maksimumu sjaja u zavisnosti od početnih parametara meteoroida. Na osnovu funkcije visine određene su gustine meteoroida za vrednosti visina rojeva dobijenih u radu Kotena i saradnika (2004) i te vrednosti se poklapaju sa realističnim vrednostima.

Na osnovu prikazanih rezultata izveden je zaključak da elementarna fizička teorija meteora korišćena u ovom radu ne opisuje dobro pojavu meteora prouzrokovanih meteoroidima brzina manjih od 16 km/s, masa reda veličine 10^{-8} kg u kombinaciji sa malim gustinama i velikim zenitnim daljinama. Mogući uzroci ovih ograničenja teorije su to što ona ne uključuje efekte isparavanja i hlađenja zračenjem i posmatraju pojavu sa aspektaj najjednostavnijeg modela meteoroida, bez uključenih procesa fragmentacije. Zato u daljem radu treba uzeti i efekte isparavanja i hlađenja zračenjem i uvesti kao promenljivu veličinu i temperaturu meteoroida i pritisak isparavanja, na osnovu čega se može doći do finijeg modela ablacije (Rogers *et al.* 2005).

Zahvalnost. Autor se pre svega zahvaljuje Igoru Smoliću, bez čije pomoći i smernica ovaj rad ne bi bio završen, a onda Branislavu Saviću, na korisnim idejama koje su dovele do konačne teme rada i pomoći oko finalnih dorada teksta rada, Marku Simonoviću, na pomoći oko matematičke i fizičke postavke integratora, Kološnjaji Bojanu, na pomoći oko programiranja i Milanu Darijeviću, na korisnim kritikama teksta rada.

Literatura

- Badabzhanov P. B. 1987. *Meteory i ih nablyudenie*. Moskva: Nauka
- Hedin A. E. 1987. MSIS-86 thermospheric model. *Geophysical Research*, **92**: 4649.
- Hedin A. E. 1991. Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere. *Geophysical Research*, **96**: 1159.
- Hill K. A., Rogers L. A., Hawkes, R. L. 2005. High geocentric velocity meteor ablation. *Astronomy & Astrophysics*, **444**: 615.
- Koten P., Borovička J., Spurny P., Betlem H., Evans S. 2004. Atmospheric trajectories and light curves of shower meteors. *Astronomy & Astrophysics*, **428**: 683.
- McKinley D. W. R. 1961. *Meteor Science and Engineering*. New York: McGraw-Hill Paperbacks
- Pecina P., Ceplecha Z. 1983. New aspects in single-body meteor physics. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **34**: 102.
- Rogers L. A., Hill, K. A., Hawkes, R. L. 2005. Mass loss due to sputtering and thermal processes in meteoroid ablation. *Planetary and Space Sciences*, **53**: 1341.
- Rubio, L. R. B. 1994. Dependence of the population index on the radiant zenithal distance. *WGN, the Journal of the IMO*, **22**: 13.
- Rubio L. R. B. 1995. Effects of a dependence of a meteor brightness on the entry angle. *Astronomy & Astrophysics*, **301**: 602.
- Rubio L. R. B., Martínez González M. J., Ruiz Herrera L., Licandro J., Martínez Delgado D., Rodríguez Gil P., Serra-Ricart M. 2002. Modeling the photometric and dynamical behavior of Super-Schmidt meteors in the Earth's atmosphere. *Astronomy & Astrophysics*, **389**: 680.
- Savić B. 1995. Elementarna fizicka teorija meteora. *Perseidi*, 2: 11.

Dušan Pavlović

Meteor Brightness Due to Standard Ablation

The flight of meteoroids through the Earth's atmosphere and evolution of the brightness of meteors due to standard ablation in single-body theory was modeled with a numerical simulation. Light curves of meteors in dependence of different initial values of velocity, mass, radiant zenith distance and meteoroid mass density was acquired. The functions that represent maximum brightness and meteor height at maximum brightness in dependence of initial parameters have been found. By analysing the observed heights of maximum brightness for different meteor showers, realistic values of meteoroid mass densities are acquired using these functions. The model is not appropriate for meteoroids with velocities smaller than 16 km/s.

