

PIOTR GRONKOWSKI, MARCIN WESOŁOWSKI

Wydział Matematyczno – Przyrodniczy Uniwersytetu Rzeszowskiego, Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno – Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego, e-mail: gronk@ur.edu.pl, marwes@ur.edu.pl

**AKTYWNOŚĆ SUBLIMACYJNA KOMETY A JEJ WIDOCZNOŚĆ
NA NOCNYM NIEBIE**

Praca przedstawia analizę aktywności sublimacyjnej hipotetycznej komety w funkcji jej odległości heliocentrycznej. W pracy pokazano, że zmiana jasności obiektu kometarnego dla ustalonej odległości heliocentrycznej zależy istotnie od zmiany wielkości tej części powierzchni jądra komety, która jest aktywna sublimacyjnie. Praca obejmuje również związaną z tym dyskusję na temat widoczności wybranych komet w zależności od stopnia zanieczyszczenia światłem nieba nocnego.

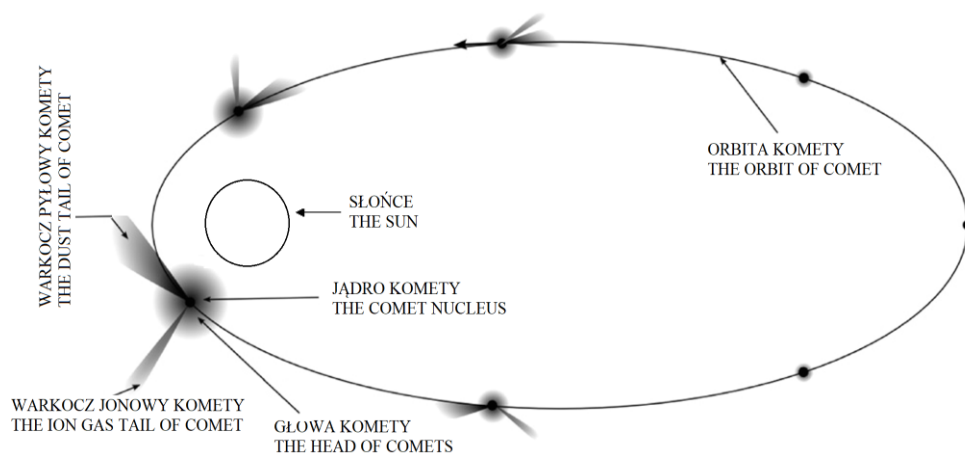
Słowa kluczowe: komety, komety z rodziny Jowisza, zanieczyszczenie światłem nieba nocnego

I. WSTĘP

Komety to małe ciała kosmiczne krążące wokół Słońca po zaburzonych krzywych stożkowych. Jeśli orbitą jest elipsa to jest tzw. kometa okresowa, jeśli parabola lub hiperbola jest to kometa jednopojawieniowa. Podstawową składową komety jest jej jądro – trwała struktura będąca nośnikiem materii kometarnej wielkości od kilkuset metrów do kilkudziesięciu kilometrów o kształcie na ogół nieregularnej bryły. Jądra kometarne zbudowane są z lodu wodnego z domieszką zlodowaciałych substancji takich jak: CO, CO₂, NH₃, itp. Oprócz tego jądra kometarne zawierają także mniejsze lub większe odłamki skał oraz pyły. Wygląd komety zmienia się wraz ze zbliżaniem się jej z głębi kosmosu do Słońca. Daleko od niego jądro komety zazwyczaj nie przejawia żadnej aktywności z powodu niskiej temperatury. Jądro jest wtedy ciemną bryłą materii praktycznie pozbawioną otoczki. Stopniowo zbliżając się do Słońca jądro zaczyna sublimować i kometa rozbudowuje swoją strukturę, która składa się z głowy (otoczki) otaczającej jądro oraz dwóch warkoczy pyłowego i jonowego. W pobliżu peryhelium swojej orbity kometa ma najbardziej rozbudowaną strukturę, a następnie gdy oddala się od Słońca jej tempo sublimacji maleje i kometa znowu staje się ciemną i zimną nieaktywną bryłą (ryc. 1).

Za każdym ponownym zbliżaniem się komety okresowej do Słońca cykl tych przemian będzie się powtarzał. Tak więc kometa w ciągu jednego okresu obiegu wokół Słońca traci pewien niewielki ułamek swojej masy. Dlatego po dostatecznie dużej ilości powrotów w pobliże Słońca - rzędu kilkuset do kilku tysięcy razy jej jądro zostaje pozbawione wystarczającej ilości lodów kometarnych pełniących rolę swoistego kleju spajającego pyły i bryły skalne. Wtedy następuje rozpad jądra komety na małe fragmenty, okruchy skalne i pyły, które stają się rojem meteoroidów. Widma komet zawierają zasadniczo dwie

składowe: ciągłą i emisyjną. Składowa ciągła powstaje w wyniku odbicia i rozproszenia światła słonecznego przez ziarna kometarne – cząsteczki pyłowo-lodowe znajdujące się w otoczce komety. Składową emisyjną produkują wzbudzone atomy i molekuły znajdujące się w otoczce i warkoczu komety. Opisany powyżej cykl zmian wyglądu komety powoduje, że wraz z jej zbliżaniem się do Słońca jej blask rośnie a po przejściu przez peryhelium zaczyna spadać osiągając minimum w pobliżu aphelium orbity. Czasami jednak zachowanie komet różni się znacznie od przedstawionego powyżej. Bywa tak, że blask komety w ciągu kilku godzin lub dni gwałtownie wzrasta, co najmniej o 1 mag. by następnie po pewnym czasie wrócić do stanu pierwotnego. Takie zjawisko nazywamy wybuchem jasności komety. Klasycznym przykładem komety wykazującej aktywność wybuchową jest kometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Zazwyczaj kometa ta wygląda jak bardzo słaby rozmyty (dyfuzyjny) obłok mający ledwo zauważalne zgęszczenie centralne. Nagle w ciągu kilku godzin staje się gwiazdopodobna a jej jasność wzrasta o 5-8 mag. ponad normalny poziom, który jest rzędu 18-19 mag. Wewnętrzna otoczka rozszerza się z prędkością rzędu 100 m/s tworząc strukturę podobną do dysku planetarnego, która po pewnym czasie przechodzi w halo kometarne o malejącej na zewnątrz jasności powierzchniowej. Widmo tej komety stanowi światło słoneczne, które zostało rozproszone na drobinach materii wyrzuconej z jej jądra. W końcu blask komety maleje i wygląd komety staje się znowu taki jak przed wybuchem. Wieloletnie obserwacje tej komety prowadzą do wniosku, że zjawisko to nie prowadzi do żadnych zmian w orbicie komety. Warto zauważyć, że ta kometa w czasie wybuchu swej jasności wyrzuca masę w ilości $10^8 - 10^9$ kg w postaci pyłów ekspandującego halo niosącego energię kinetyczną rzędu 10^{12} J. Generalnie wybuchy innych komet przebiegają podobnie. Istnieje wiele hipotez próbujących wyjaśnić przyczynę tego zjawiska. Można je podzielić generalnie na dwie grupy: przyczyny zewnętrzne i wewnętrzne. Do przyczyn zewnętrznych zalicza się zderzenia komet z innymi małymi ciałami orbitującymi w Układzie Słonecznym lub wpływ wiatru słonecznego na kometa. Do przyczyn wewnętrznych należy transformacja amorficznego lodu kometarne do postaci krystalicznej, naprężenia termiczne i mechaniczne lub polimeryzacja HCN [Gronkowski 2007, Gronkowski i Wesołowski 2015].



Ryc. 1. Zmiana wyglądu komety w czasie jej obiegu wokół Słońca

Fig. 1. Changing the appearance of the comet during its rotation around of the Sun

Trzy kwestie wydają się być godne podkreślenia. Po pierwsze, w świetle współczesnych badań sądzi się jednak, że wybuchy jasności komet mogą mieć różne źródła lub może je wywoływać jednoczesna kombinacja kilku przyczyn. Po drugie, prawdopodobnie niektóre wybuchy jasności komet nie są wykrywalne. Jest to konsekwencja faktu, że większość przypadków tego zjawiska jest odkrywana w oparciu o obserwacje wizualne. Z drugiej strony istnieje duża trudność w oszacowaniu blasku komety z dokładnością większą niż $\pm 0,5$ mag. Dlatego wybuchy blasku komet mają szansę być wykryte jeśli ich amplituda jest co najmniej rzędu 1,5 mag. [Gronkowski i Wesołowski 2015]. Po trzecie, obserwacje komet mogą być bardzo pomocne przy określaniu jasności nieba nocnego. Oryginalna metoda kometarna oceniania jasności nieba nocnego została opracowana przez Ścieżora [2013]. Jej istota polega na wyznaczaniu jasności powierzchniowej najsłabszych widocznych na niebie obiektów rozmytych. Przydatne do obserwacji są takie obiekty, które mają możliwie płaski w przestrzeni rozkład jasności bez wyróżnionego maksimum. Wiele komet to właśnie obiekty rozmyte, których jasność powierzchniowa jednostajnie maleje w kierunku od centrum na zewnątrz aż do zrównania się jasności głowy komety z tłem nieba nocnego. Dlatego komety mogą służyć do oceny jasności nieba nocnego. Z drugiej strony wybuchy ich blasku prowadzące do istotnego zwiększenia jasności powodują, że te obiekty astronomiczne mogą być obserwowane w miejscach gdzie istnieje duże zanieczyszczenie nieba nocnego sztucznym światłem.

W celu oszacowania stopnia „zanieczyszczenia światłem” nieba nocnego używana jest klasyfikacja Bortle’a [2001], która uwzględnia dziewięć typów nieba:

Klasa 1 – nadzwyczaj ciemne niebo – widoczne jest światło i pas zodiakalny. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 7,6-8,0 mag, niebo tego typu występuje w okolicach równikowych.

Klasa 2 – typowe ciemne niebo – przy horyzoncie widoczna jest poświata atmosferyczna, wyraźnie widoczna jest struktura Drogi Mlecznej. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 7,1-7,5 mag. Według polskich astronomów takie warunki panują np. w południowo – wschodniej Polsce (pasmo górskie – Karpaty).

Klasa 3 – niebo wiejskie – horyzont jest znacznie jaśniejszy od zenitu, światło zodiakalne jest wyraźnie widoczne wiosną i jesienią. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 6,6-7,0 mag.

Klasa 4 – niebo w rejonach przedmieść – nad linią horyzontu wyraźnie widoczny jest blask pochodzący od okolic. W tym przypadku widoczna jest Droga Mleczna, ale bez wyraźniej struktury. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 6,1-6,5 mag.

Klasa 5 – niebo podmiejskie – światło zodiakalne jest widoczne tylko podczas najciemniejszych nocy, natomiast Droga Mleczna jest niewyraźna. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd jest rzędu 5,6-6,0 mag.

Klasa 6 – jasne niebo podmiejskie – światło zodiakalne jest zupełnie niewidoczne a Droga mleczna jest tylko częściowo widoczna w zenicie. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 5,1-5,5 mag.

Klasa 7 – niebo na pograniczu przedmieścia – miasto – cała struktura nieba ma odcień szaro – biały. Światło rozchodzi się w każdym kierunku, powodując oświetlanie obłoków. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd jest rzędu 4,6-5,0 mag.

Klasa 8 – niebo w mieście – całe niebo jest oświetlone (zanieczyszczone) sztucznym światłem. Konstelacje gwiazd na sferze niebieskiej w większości przypadków są nierozpoznawalne. Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 4,1-4,5 mag.

Klasa 9 – niebo w centrum miasta – całe niebo łącznie z zenitem jest oświetlone.
Z obiektów astronomicznych widoczne są Księżyc, planety oraz najjaśniejsze gwiazdy.
Zasięg wizualny najsłabszych gwiazd wynosi 4,0 mag.

Celem przedstawionej pracy jest analiza aktywności sublimacyjnej hipotetycznej komety w funkcji jej odległości od Słońca oraz dyskusja jej widoczności na nocnym niebie w zależności od jego stopnia zanieczyszczenia światłem.

II. MATERIAŁ I METODY

Nasze rozważania będą ogniskowały się wokół aktywności hipotetycznej komety należącej do tzw. rodziny Jowisza. Taka kometa jest okresowa i porusza się wzdłuż eliptycznej orbity. Rodzinę komet Jowisza określa tzw. kryterium Tisseranda, które można sformułować w następującej postaci:

$$T = \frac{a_J}{a} + 2 \cdot \cos i \cdot \sqrt{(1-e^2) \cdot \frac{a}{a_J}}, \quad (1)$$

gdzie: T , a_J , a , i , e – odpowiednio oznaczają parametr Tisseranda ($T=2,5$), wielką pół oś orbity Jowisza ($a_J=5.2$ j.a.), wielką pół oś orbity komety (a), nachylenie płaszczyzny orbity komety do płaszczyzny ekliptyki ($i=0^\circ$) oraz mimośród jej orbity ($e = 0,85$). W oparciu o tak przyjęte założenia z równania (1) wynika, że wielkość dużej półosi komety wynosi $a=3,08$ j.a. Odległość perihelium i aphelium orbity komety są wtedy równe:

$$q = a \cdot (1 - e) = 0,46 \text{ j.a.},$$

$$Q = a \cdot (1 + e) = 5,70 \text{ j.a.}$$

Podstawowym równaniem określającym warunki fizyczne na powierzchni jądra komety jest równanie równowagi energetycznej, które możemy zapisać w następującej postaci:

$$\frac{S(1-A_l)}{4 \cdot d^2} \cdot \cos \varphi = \varepsilon \sigma T^4 + \frac{L(T) \dot{Z}}{N_A} + h K(T) \frac{\Delta T}{\Delta x}. \quad (2)$$

W powyższym równaniu lewa strona oznacza moc promieniowania słonecznego absorbowaną przez powierzchnię jądra komety. Składniki prawej strony oznaczają odpowiednio: moc odpromieniowaną przez jądro, moc wykorzystaną na sublimację lodów kometarnych oraz moc przewodzoną do wnętrza jądra komety. Wszystkie składniki obu stron równania są odniesione do jednostkowej powierzchni jądra. Przyjęto następujące oznaczenia: S – stała słoneczna, A_l – albedo (współczynnik odbicia jądra komety), d – odległość heliocentryczna jądra komety (wyrażoną w AU), φ – kąt padania promieni słonecznych na element powierzchni jądra komety, ε – zdolność emisyjna jądra komety, σ – stała Stefana Boltzmanna, T – temperatura przy powierzchni komety, $L(T)$ – ciepło sublimacji lodów kometarnych, N_A – liczba Avogadro, h – oznacza tzw. czynnik Hertza, $K(T)$ – przewodność cieplna warstwy powierzchniowej jądra, ΔT – różnica temperatur pomiędzy brzegami warstwy powierzchniowej jądra o grubości Δx .

W celu numerycznego rozwiązania równania równowagi energetycznej dla powierzchni jądra komety należy również wziąć pod uwagę równanie równowagi fazowej Clausiusa-Clapeyrona, równanie stanu gazu doskonałego oraz formułę na tempo sublimacji lodów kometarnych [Keller 1990]. Maksymalne tempo sublimacji lodów kometarnych wyraża się wzorem:

$$\dot{Z} = n \cdot v_g = \frac{A \cdot e^{-B/T}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k_B \cdot T}}. \quad (3)$$

W powyższym równaniu przyjęto następującą notację: n – koncentracja molekuł gazu kometarnego, v_g – prędkość jego molekuł, A – stała dla danego gazu wyrażona w jednostkach ciśnienia, B – stała dla danego gazu wyrażona w jednostkach temperatury, m – masa molekuly sublimującego lodu, k_B – stała Boltzmanna, pozostałe symbole mają taki sam sens jak powyżej.

Autorzy różnych hipotez dotyczących wybuchów jasności komet są zgodni w tym, że przyczyną wyjaśnienia tych ciał niebieskich jest odrzucenie pewnej części warstwy powierzchniowej jądra w formie obłoku ziaren kometarnych do atmosfery komety. Powoduje to odsłonięcie warstw podpowierzchniowych bogatych w lody kometarne, co skutkuje istotnym zwiększeniem tempa sublimacji z komety. W naszych rozważaniach przyjmujemy, że aktywność sublimacyjna komety kontrolowana jest tylko przez sublimację lodu wodnego. Przyjmujemy również dla uproszczenia, że jądro kometarne ma kształt kulisty. Poniżej przedstawimy skrótowo najważniejsze formuły wykorzystane do wyznaczenia zmian jasności hipotetycznej komety z rodziny Jowisza. Więcej szczegółów można znaleźć między innymi w pracach Gronkowskiego [2002a, 2002b, 2005, 2007]. Wyniki misji kosmicznych do jąder kometarnych jednoznacznie wskazują, że sublimacja zachodzi nie z całej powierzchni jądra lecz tylko z niewielkiej jego części. W dalszych rozważaniach zakładamy, że $\eta(t_1)$ oznacza ułamek całkowitej powierzchni jądra komety, który jest aktywny sublimacyjnie w fazie spokojnej sublimacji. Wtedy analogiczna wielkość $\eta(t_2)$ dla chwili wybuchu jasności wyraża się wzorem:

$$\eta(t_2) = \eta(t_1) + \frac{M_{ej}}{4\pi h' \rho_N R_N^2}. \quad (4)$$

W powyższym równaniu M_{ej} , h' , ρ_N i R_N oznaczają odpowiednio: masę odrzuconą przez jądro w czasie wybuchu, grubość tej warstwy, gęstość jądra komety oraz jego promień.

Masę odrzuconą M_{ej} można obliczyć z następującego równania:

$$M_{ej} = \frac{4}{3} \pi N_e \rho_N \int_{a_{min}}^{a_{max}} f(a) a^3 da. \quad (5)$$

W tym równaniu N_e oznacza ilość wszystkich cząstek odrzuconych z jądra w czasie wybuchu. Z kolei masę ziaren kometarnych $M_{gr}(t_i)$ uniesionych w wyniku sublimacji z powierzchni jądra komety do jej atmosfery przedstawia zależność:

$$M_{gr}(t_i) = \frac{4}{3} \pi N_{gr}(t_i) \rho_N \int_{a_{min}}^{a_{max}} f(a) a^3 da = \chi M_g(t_i), \quad (6)$$

gdzie indeks $i=1$ dotyczy spokojnej fazy sublimacji, indeks $i=2$ dotyczy fazy wybuchu.

Tu przyjęliśmy, że: $N_{gr}(t_i)$, χ oraz $M_g(t_i)$ oznaczają odpowiednio ilość wszystkich ziaren uniesionych z komety w wyniku sublimacji, stosunek masy ziaren kometarnych do gazu w atmosferze komety, masę tego gazu. Ten ostatni parametr spełnia zależność:

$$M_g(t_i) = 4\pi R_N^2 \eta(t_i) \dot{Z} m \frac{R_h}{v_g}, \quad (7)$$

R_h oznacza w tym równaniu promień głowy komety. Układ równań (4) – (7) oraz prawo Pogsona, które pozwala obliczyć zmianę jasności ciał niebieskich pozwolą nam wyznaczyć

skok blasku komety w czasie jej wybuchu. Prawo Pogsona dla komety, która uległa wybuchowi ma postać:

$$\Delta m = -2.5 \log \frac{Al \cdot S_N + C_{sca}(t_2) + C_{sca}(e)}{Al \cdot S_N + C_{sca}(t_1)}, \quad (8)$$

gdzie: Al – oznacza albedo jądra komety, S_N – oznacza przekrój jądra komety, $C_{sca}(t_1)$ i $C_{sca}(t_2)$ – to całkowity przekrój rozproszeniowy pyłowo – lodowych cząstek lodu kometarnego, $C_{sca}(e)$ – to przekrój rozproszeniowy wyrzuconych w czasie wybuchu cząstek kometarnych, które pochodzą z destrukcji odrzuconej warstwy jądra komety.

W oparciu o prawa elektrodynamiki możemy napisać, że przekroje rozproszeniowe dane są następującymi zależnościami:

$$C_{sca}(t_i) = \pi N_p(t_i) \int_{a_{min}}^{a_{max}} Q(a, \lambda, m) f(a) a^2 da, \quad (9)$$

oraz

$$C_{sca}(e) = \pi N_e \int_{a_{min}}^{a_{max}} Q(a, \lambda, m) f(a) a^2 da.$$

W powyższych równaniach poszczególne symbole mają następujące znaczenie: $N_p(t_i)$ – oznacza całkowitą ilość cząstek o łącznym przekroju rozproszeniowym $C_{sca}(t_i)$, N_e – to całkowita ilość kometarnych ziaren wyrzucona w czasie wybuchu, $Q(\lambda, a, m)$ – efektywny współczynnik rozpraszania (obliczany jest na podstawie teorii Mie), a – promień cząstki, m – względny współczynnik załamania, $f(a)$ – funkcja rozkładu ilości cząstek względem wymiarów ich promieni. W obliczeniach została wykorzystana następująca postać funkcji dystrybucji [3]:

$$f(a) = k \cdot \left(1 - \frac{a_0}{a}\right)^M \left(\frac{a_0}{a}\right)^N, \quad (10)$$

gdzie: k – jest stałą normalizacyjną, M – jest funkcją odległości komety od Słońca, N – oznacza nachylenie spadku krzywej rozkładu (dla dużych cząstek jest ona rzędu 4).

III. WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

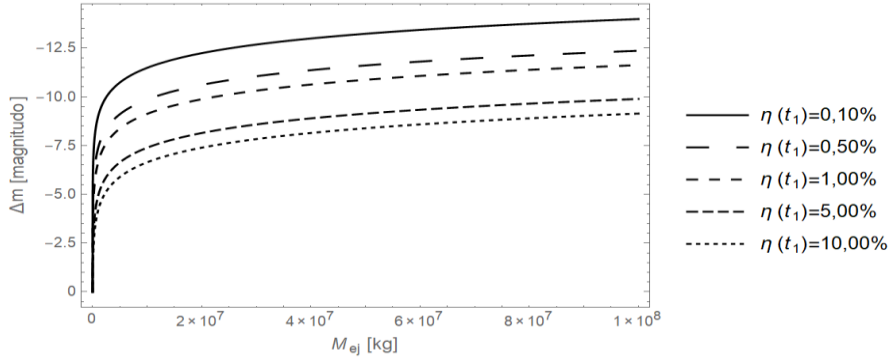
W obliczeniach numerycznych uwzględniono stałe fizyczne dla komet pokazane poniżej (tab. 1).

Tabela 1 – Table 1

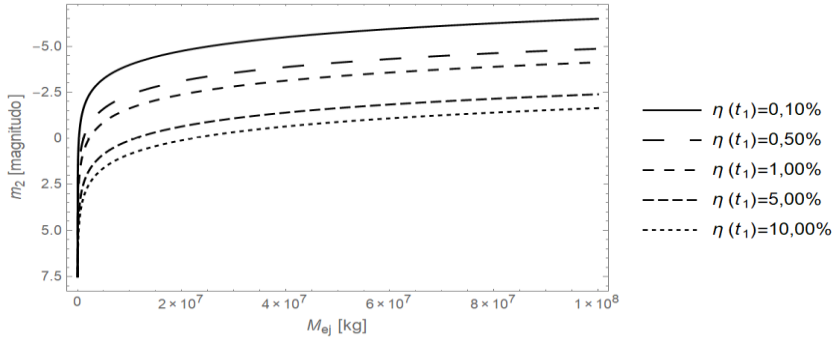
Wartość parametrów fizycznych wykorzystanych w obliczeniach numerycznych / *Values of the physical cometary parameters used in the numerical calculations* [Gronkowski 2007, Gronkowski and Wesołowski 2015]

Wielkość fizyczna / Parameter	Wartość liczbową / Values
stała „A” dla lodu H ₂ O / the constant „A” for water ice	$A_{H_2O} = 356 \cdot 10^{10}$ [Pa]
stała „B” dla lodu H ₂ O / the constant „B” for water ice	$B_{H_2O} = 6141,667$ [K]
albedo jądra komaty / the albedo of the nucleus	$Al = 0,04$ [-]
zdolność emisyjna / the infrared emissivity	$\varepsilon = 0,9$ [-]
gęstość jądra komety / the density of the comet nucleus	$\rho = 400$ [kg/m ³]
promień jądra komety / the radius of the comet nucleus	$R_N = 1000$ [m]
czynnik Hertza / the Hertz factor	$h = 0,01$ [-]
promień głowy komety w czasie wybuchu / the radius of the cometary head during the outburst	$R_h = 1 \cdot 10^8$ m
współczynnik rozproszenia światła / the coefficient of light scattering	$Q_{SCAT} = 2,00$ [-]
promienie ziaren kometarnych / the radius of a cometary grain	$a_{min} = 10^{-7}$ m, $a_{max} = 10^{-3}$ m
współczynnik przewodności cieplnej dla lodu H ₂ O / the crystalline ice conductivity for water ice	$K(T) = 567 \cdot T^{-1}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

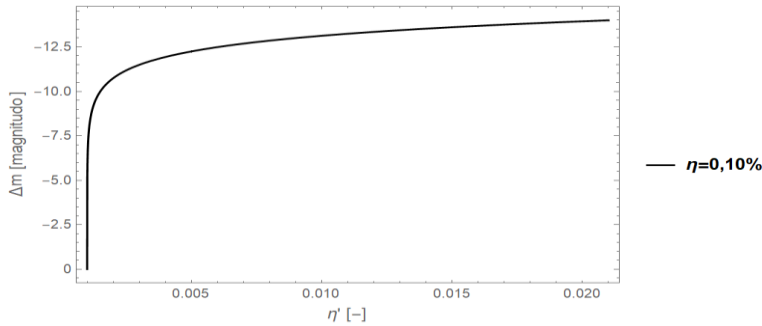
W dalszej części pracy przedstawiono zmiany jasności komety spowodowane wybuchem. Założono, że aktywność sublimacyjna komety jest kontrolowana przez sublimację lodu wodnego, a kometa znajduje się w odległości heliocentrycznej $d = 3,08$ j.a.



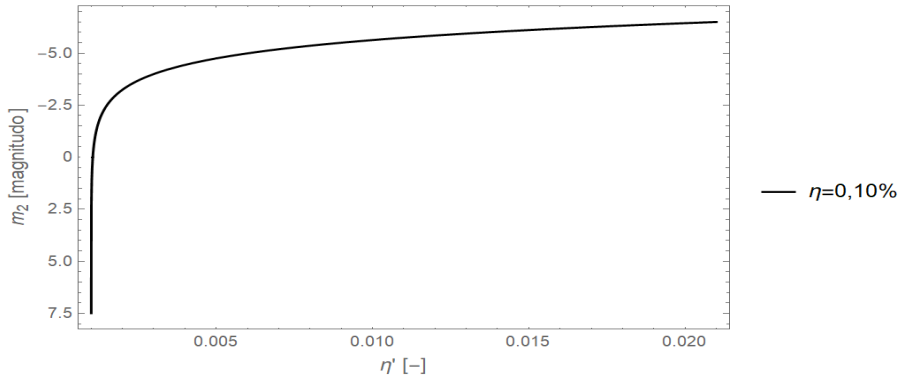
Ryc. 2. Skok jasności komety w funkcji parametru M_{ej} dla różnych wartości parametru $\eta(t_1)$
Fig. 2. The jump in the cometary brightness as a function of parameter M_{ej} for different values of the parameter $\eta(t_1)$



Ryc. 3. Jasność komety po wybuchu w funkcji parametru M_{ej} dla różnych wartości parametru $\eta(t_1)$. Założono, że początkowa jasność komety jest $m_1 = 7,5$ mag
Fig. 3. The brightness of the comet after the outbursts as a function of parameter M_{ej} for different values of the parameter $\eta(t_1)$. It is assumed that the initial brightness of comets is $m_1 = 7,5$ mag

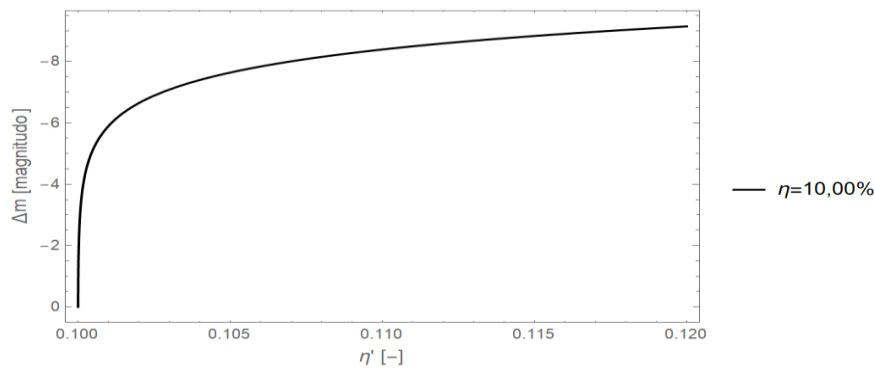


Ryc. 4. Skok jasności komety w funkcji parametru $\eta(t_2)$. Przyjęto, że $\eta(t_1) = 0,1\%$
Fig. 4. The jump in the cometary brightness as a function of parameter $\eta(t_2)$. It is assumed that $\eta(t_1) = 0,1\%$



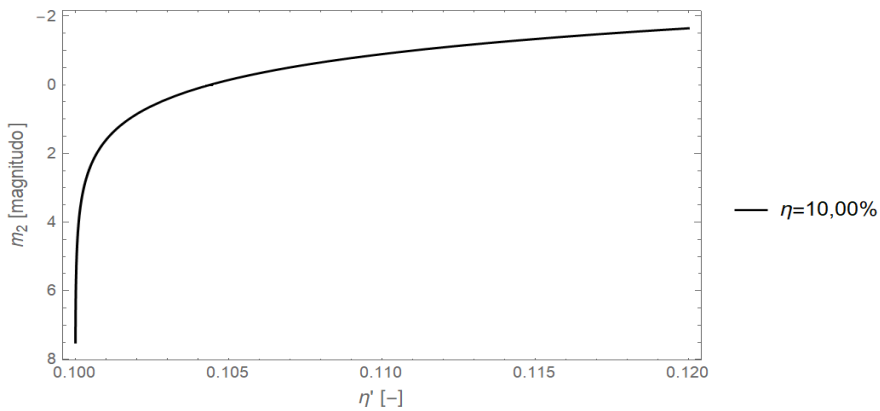
Ryc. 5. Jasność komety po wybuchu jako funkcja parametru $\eta(t_2)$. Założono, że początkowa jasność komety jest $m_1=7,5$ mag

Fig. 5. The brightness of the comet after the outbursts as a function of parameter $\eta(t_2)$. It is assumed that $m_1 = 7,5$ mag



Ryc. 6. Sytuacja jak na rys.4, ale przyjęto, że $\eta(t_1)=10\%$

Fig. 6. The same as on fig.4, but it is assumed that $\eta(t_1)=10\%$



Ryc. 7. To samo co na rys. 5, ale przyjęto, że $\eta(t_1)=10\%$

Fig. 7. The same as on Fig. 5, but it is assumed that $\eta(t_1)=10\%$

W tabeli 2 został przedstawiony rozkład widzialności komety pochodzącej z rodziny Jowisza z uwzględnieniem całej klasyfikacji Bortle'a.

Tabela 2 – Table 2

Widzialność komety na nocnym niebie. Przyjęto, że kometa jest: „+” – widoczna, „–” niewidoczna
The visibility of comets on the night sky. It is assumed that the comet is: „+” - visible, „–” invisible

Klasy nieba / <i>The class of the sky</i>	m_1 [mag.]		
	10	15	20
I → (8.0 mag.)	+	+	–
II → (7.5 mag.)	+	+	–
III → (7.0 mag.)	+	+	–
IV → (6.5 mag.)	+	+	–
V → (6.0 mag.)	+	–	–
VI → (5.5 mag.)	+	–	–
VII → (5.0 mag.)	+	–	–
VIII → (4.5 mag.)	+	–	–
IX → (4.0 mag.)	+	–	–

IV. PODSUMOWANIE

W prezentowanej pracy założono, że początkowa jasność komety m_1 w odległości heliocentrycznej $d = 3.08$ j.a. może przyjmować odpowiednio wartości 10, 15 oraz 20 mag. W ten sposób wykorzystano fakt, że komety charakteryzują się bardzo dużym zakresem jasności zależnym od fizyki obiektu. Warto zauważyć, że w obliczeniach numerycznych przyjęto, że: $\eta(t_1) = 1\%$, $M_{ej} = 10^7$ kg, co powoduje skok jasności $\Delta m = -8,72$ mag. Analiza przedstawionych w pracy wykresów może prowadzić do wniosku, że wybuchy jasności rozważanej hipotetycznej komety mogą być dostrzeżone nawet wtedy, gdy w fazie spokojnej kometa jest niewidoczna. Zamieszczone w pracy ilustracje wzrostu jasności komety spowodowanego wybuchem, obejmują założenie, że jej blask w fazie spokojnej sublimacji jest równy $m_1 = 7,5$ mag. Takie założenie było podyktowane faktem, że ta wielkość odpowiada zasięgowi wizualnemu najsłabszych gwiazd dla typowego ciemnego nieba klasy 2 w skali Bortle'a. Tak, więc prosta analiza przedstawionych wykresów wskazuje na to, że szereg wybuchów jasności normalnie niewidocznych komet może być zaobserwowanych nawet na tych obszarach gdzie istnieje pewne zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba.

BIBLIOGRAFIA

1. Bortle J. E. 2001. Introducing the Bortle Dark-Sky Scale. *Sky & Telescope*. 101 (2). 126- 129.
2. Gronkowski P. 2002a. Cometary outbursts - search of probable mechanisms - case of 29P/Schwassmann-Wachmann 1. *Astronomische Nachrichten*. 323 (1). 49-56.
3. Gronkowski P. 2002b. Wybuchy komet w znacznych odległościach od Słońca. Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego. ISBN 83-7338-006-X.

4. Gronkowski P. 2005. The source of energy of the comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 outburst activity: the test of the summary. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 360 (3). 1153-1161.
5. Gronkowski P. 2007. The search for a cometary outbursts mechanism: a comparison of various theories. *Astronomische Nachrichten*. 328 (2). 126-136.
6. Gronkowski P., Wesołowski M. 2015. A model of cometary outbursts: a new simple approach to the classical question. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 451 (3). 3068-3077.
7. Keller H.U. 1990. The Nucleus. [In:] Huebner W. F., (ed.) *Physics and Chemistry of Comets*. Springer-Verlag. 13-68.
8. Scieżor T. 2013. A new astronomical method for determining the brightness of the night sky and its application to study long-term changes in the level of light pollution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 435 (1). 303-310.

SUBLIMATION ACTIVITY OF A COMET AND ITS VISIBILITY ON THE NIGHT SKY

Summary

The paper presents an analysis of the sublimation activity of a hypothetical comet as a function of its heliocentric distance. The study shows that the change in brightness of the comet for a fixed heliocentric distance depends significantly on the change in the size of this part of the comet nucleus surface, which is sublimation active. The paper also includes the related discussion of visibility of the selected comets depending on the degree of light pollution of the night sky.

Key words: comets – Jupiter family comets, the light pollution of the night sky