9. Kotera K. The Astrophysics of Ultrahigh Energy Cosmic Rays / K. Kotera, A. V. Olinto // Ann. Rev. of Astron. and Astrophys. – 2011. – 49. – P. 119–153.
10. Blasi P. The origin of galactic cosmic rays / P. Blasi // Astron. & Astroph. Rev. – 2013. – Vol. 21, id.70.
11. Neronov A. Supernova Origin of Cosmic Rays from a γ-Ray Signal in the Constellation III Region of the Large Magellanic Cloud / A. Neronov // Phys. Rev. Lett. – 2017. – Vol. 119, id.191102.
12. Caprioli D. Understanding hadronic emission from supernova remnants / D. Caprioli // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2011. – Issue 05, id. 026.
13. Gabici S. Gamma-ray emission from supernova remnants and surrounding molecular clouds : AIP Conference Proceedings / S. Gabici. – Vol. 1792, Issue 1, id.020002.
14. Investigating the Structure of Vela X eprint arXiv:1808.03878 / P. Slane et. al.

Надійшла до редколегії 15.11.18

Р. Гнатык, инж.,
К. Винокурова, студ.,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ТЭВНОГО ДИАПАЗОНА ОТ ОСТАТКА ВСПЫШКИ СВЕРХНОВОЙ ПАРУСА

Остатки сверхновых считаются одними из основных источников галактических космических лучей (КЛ) с энергиями до 10^{17} эВ. Экспериментальным подтверждением присутствия ядерного компонента КЛ в остатках является их гамма-излучение очень высоких энергий (более 100 ГэВ) как результат неупругих столкновений КЛ с мишенями-атомами межзвездной среды внутри и в окрестности остатков. В работе рассчитаны ожидаемые потоки такого гамма-излучения от одного из ближайших к Земле остатка сверхновой Паруса. Проанализирована возможность регистрации локализованных источников гамма-излучения внутри остатка, обусловленных присутствием областей повышенной плотности газа в результате испарения межзвездных облаков за фронтом ударной волны остатка.

Ключевые слова: космические лучи, гамма-излучение, остатки вспышек сверхновых, остаток Паруса.

R. Gnatyk, ing.,
K. Vynokurova, stud.,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

TEV GAMMA-RAY RADIATION FROM VELA SUPERNOVA REMNANT

Sources and mechanisms of acceleration of the cosmic rays (CR) – a stream of nuclei, electrons and, to a lesser extent, antiparticles with a nonthermal power law energy spectrum extending to energies above 10^{20} eV, are still unknown. Theoretical calculations and experimental data show that the diffusive acceleration of the CR at the shock wave fronts (first order Fermi mechanism) in Galactic sources, first of all in the Supernova remnants (SNR), may be responsible for the observed CR flux with energies up to $E \le 10^{18}$ eV. In this case, the lepton component of the CR (electrons, positrons) is confidently manifested in the SNR due to synchrotron radiation in a turbulent magnetic field inside the SNR. At the same time, the proton and nuclear component is not effective in synchrotron emission under typical CR parameters and magnetic fields in the SNR. Its presence in the SNR can be revealed due to the hadron mechanism of gamma-ray generation – the decay of neutral pions generated by inelastic collisions of the CR with particles-targets – atoms of interstellar medium inside and in the vicinity of SNR. Now only a few SNRs with a detectable gamma-ray flux of a hadron origin are known, in which the interaction of SNR with molecular clouds is observed, which provides the necessary concentration of particles-targets for CR.

In our work we calculate the expected fluxes of such gamma-radiation from the Vela SNR, one of the closest SNR to the Earth, which evolves in a cloudy interstellar medium and is a potential candidate for the hadron mechanism gamma-ray source. The possibility of detecting Vela SNR with modern (Magic, HAWC, H.E.S.S.) and future (CTA) gamma-ray detectors is analyzed. It is shown that the sensitivity of CTA will be sufficient to detect the gamma-radiation generated by the hadron mechanism.

Also we analyzed the possibility of registration of localized sources of gamma-radiation within the Vela SNR due to the presence of high gas density clouds. The fluxes from the two most massive clouds within the Vela SNR are calculated and compared with the sensitivity of the modern and future gamma-ray detectors. It is shown that sufficient sensitivity to detect the most massive clouds within the SNR will have the CTA facility if the spectrum of the gamma-rays generated by the hadron mechanism is without cut-off on the energy 10 TeV.

Key words: cosmic rays, gamma-ray radiation, Supernova remnants, Vela Supernova remnant

УДК 520.82; 523.6; 523.68

П. Козак, канд. фіз.-мат. наук,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

МЕТЕОРИ З МУЛЬТИМОДАЛЬНИМИ КРИВИМИ БЛИСКУ: СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ЯКІСНІ МОДЕЛІ

Розглянуто проблему телевізійної реєстрації метеорів з аномальними кривими блиску, зокрема з мультимодальними та бімодальними їх типами. Наведено результати спостережень двох метеорів з потоку Персеїди, отримані за допомогою телевізійних систем типу суперізокон. Одна з кривих блиску має мультимодальний характер і може бути пояснена дробленням тіла, інша належить до явно вираженого бімодального типу, який не можна на сьогодні остаточно пояснити. Запропоновано якісні моделі для інтерпретації метеора з бімодальною кривою блиску. Одна з них передбачає двокомпонентний склад метеороїда, коли тіло, по суті, складається із двох частинок. Інший варіант – однорідний монолітний метеороїд зі специфічною геометричною формою та параметрами можливого обертання тіла. Запропоновані моделі є найпростішими за кількістю варіативних параметрів і можуть претендувати на дос-

товірність при успішному проведенні кількісного аналізу. Зазначено, що остаточно підтвердити чи спростувати тип моделі можна лише при проведенні паралельних спектральних спостережень метеорів.

Ключові слова: метеори, відеоспостереження метеорів, аномальні метеори, фотометрія, криві блиску метеорів, бімодальні та мультимодальні криві блиску метеорів, фізична модель руху метеора в атмосфері, якісний аналіз результатів спостережень.

Вступ. Нині телевізійні або відеоспостереження метеорів практично повністю витіснили фотографічні. У Метеорній базі даних Міжнародного астрономічного союзу кількість фотографічних метеорів з розрахованими елементами орбіти становить 4 873, у той час як база даних відеоспостережень налічує більше 110 000 метеорів (MDC IAU, https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/) [1, 2] та неперервно поповнюється [3]. На загальному тлі збільшення кількості даних про метеори все чіткіше проявляються особливості деяких їхніх типів, які суттєво відрізняються від середньостатистичних. Такі метеори часто називають аномальними, причому аномаліями можуть бути як кінематичні характеристики деяких метеорів, так і їхні фотометричні характеристики.

Найбільш класичним випадком аномалій кінематичних параметрів метеорів, хоча й не новим, є наявність серед спостережуваних метеорів частинок, що прилетіли ззовні Сонячної системи. Такі метеороїди мають гіперболічні геліоцентричні орбіти ($a < 0$, $e > 1$), однак це ще не є доказом їхнього зовнішнього (відносно Сонячної системи), тобто міжзоряного походження. Очевидно, що зближення метеороїда в минулому з великою планетою може змінити до того еліптичну орбіту частинки на гіперболічну. Незважаючи на неодноразову реєстрацію гіперболічних метеороїдів за допомогою радарів [4, 5], достовірні випадки реєстрації таких частинок в оптичному діапазоні є надзвичайно рідкісними. Мова йде про достовірно визначену гіперболічну орбіту метеороїда, оскільки похибка обчислення його швидкості при вході в атмосферу становить близько 1–2 км/с. Чи не єдиним, але найвідомішим випадком реєстрації двох явно виражених міжзоряних метеороїдів є роботи [6, 7], де повідомляється про телевізійну реєстрацію двох міжзоряних метеороїдів з геліоцентричними швидкостями 49.9 ± 1.7 та 48.4 ± 0.6 км/с, що разом з похибками суттєво перевищує гіперболічну межу.

Іншим типом аномальних проявів є реєстрація ультракоротких спалахів метеорної активності деяких метеорних потоків. У роботі [8] повідомляється про реєстрацію 100–150 метеорів за 2 с, а в [9] – про 15 метеорів за 4 с та 38 метеорів – за 2 с, що спостерігалися в метеорному потокові Леоніди. В останній роботі робиться висновок, що існування компактної кластерної структури частинок у деяких метеорних роях розміром у кілька сотень кілометрів має бути продуковане кометним ядром не раніше останнього проходження нею перигелію, тобто це нові утворення.

Цікавим проявом аномальної поведінки метеорів є спостереження метеороїдів, дотичних до земної атмосфери, коли після проходження перигею частинка не випаровується повністю, а продовжує рух далі в космічний простір. Після зустрічі із Землею такий метеороїд незначно міняє свою орбіту, а також масу. За загальними ознаками дане явище має спостерігатися відносно часто, однак на сьогодні офіційно зареєстровано лише кілька подій. Яскравий болід -18^m було зареєстровано вдень у 1972 р. над територією США та Канади [10]. Болід мав масу 10^6 кг і відстань до поверхні Землі в перигеї 58 км. Три інші метеори були значно слабші: болід над Чехією та Польщею 1990 р. мав зоряну величину -6^m [11]; болід -8^m був зареєстрований у 2006 р. над Японією [12]; метеор -4^m спостерігався у 2016 р. над Іспанією [13]. Найслабший дотичний метеор +3^m було зареєстровано у 2003 р. над Україною [14], теоретичне моделювання його руху в атмосфері описане в [15]. В усіх цих випадках мінімальне зближення метеороїдів з поверхнею Землі було близько 100 км. Така невелика кількість зареєстрованих дотичних метеороїдів може, імовірно, бути пояснена помилковими оцінками точності обробки метеорних спостережень – адже після перигею висоти таких частинок над рівнем моря формально починають зростати, що може бути прийнято за помилку розрахунків, а сам метеор виключено з каталогу.

Метеори з аномальними висотами появи, тобто такими, що перевищують 130 км, на сьогодні вже не є чимось рідкісним [16]. За допомогою телевізійних спостережень було зареєстровано метеор -3.5^m з потоку Персеїд у 1993 р. над Києвом [17, 18] з висотою появи близько 137 км. Найвідомішим став випадок реєстрації двох яскравих метеорів -7^m та -4^m у Японії при спостереженні метеорного потоку Леоніди в 1995-1996 рр. – вони мали висоти появи близько 160 км [19]. При спільних фотографічних [20] і відеоспостереженнях [21] метеорного потоку Леоніди в 1998 р. у Китаї на телевізійних камерах 12 болідів починалися суттєво раніше фотографічних – автори [21] декларують висоту появи 145–200 км. Паралельні спостереження того самого потоку в Монголії [22] дають лише кілька метеорів з аномальними висотами появи 130–145 км. Згодом метеори з висотами появи більше 130–175 км реєструвалися неодноразово (хоча точність обчислень не завжди була достатньо надійною), а іноді й не лише у швидкісних метеорних потоках [23–28]. Загальної теорії, яка пояснювала б із фізичного погляду появу метеорів на висоті значно вище не лише температури випаровування (абляції), але й температури плавлення, на сьогодні не існує. Автори [29] говорять про дифузну структуру метеора на надвеликих висотах і про новий тип радіації (світіння), пов'язаний з ударними зіткненнями з атомами атмосфери [30], однак така теорія наводиться лише якісно і потребує доведення.

Не менш цікавими з наукового погляду є фотометричні аномалії в метеорах. У першу чергу, як уже було сказано у [29], – це дифузна структура метеора на початкових надвеликих висотах. Далі автори [31], використовуючи швидкісну відеотехніку (1000 кадрів/с), демонструють специфічний вигляд метеорної коми в яскравого боліда, що більше нагадує форму ударної хвилі, яку також неможливо інтерпретувати в рамках сучасної теорії. У роботах [32, 33] наводяться результати обробки деяких метеорів, які демонструють, на думку авторів, поперечні джети завдовжки 0.5-1 км, пояснення яких загалом, і зокрема в даному випадку, також незрозуміле – адже за результатами обробки метеорних зображень, отриманих випадково камерою на телескопі Subaru [34], ширина світної метеорної коми лежить у діапазоні 50–100 м (хоча йдеться переважно про слабкі метеори).

Одним з найцікавіших феноменів є аномальні криві блиску метеора, оскільки води демонструють нестандартну поведінку явища, яке залежить від густини та внутрішньої структури космічної частинки, зокрема її пористості. Класична крива блиску передбачає, що метеор спочатку повільно, а потім усе швидше "розгоряється", збільшуючи блиск, досягає максимальної величини світіння, а потім дещо швидше (іноді – дуже швидко) згасає. Така форма кривої блиску досить упевнено пояснюється дією переважно двох параметрів: густини атмосфери, яка зростає на шляху метеора, і величиною його міделя (поперечного до напрямку руху розміру), який зменшується через випаровування тіла. Коливання інтенсивності блиску вздовж траєкторії, які неодноразово спостерігалися [35, 36] (іноді – досить суттєві), хоча і не пояснюються класичною теорією руху монолітного тіла, однак досить легко можуть бути інтерпретовані дробленням частинки. Варіюючи параметри дроблення, можна пояснити досить різноманітні флуктуації інтенсивності випромінювання в так званих мультимодальних кривих блиску метеора. Однак існують випадки бімодальних кривих блиску, коли блиск метеора спочатку повністю (або майже повністю) зникає, а потім поновлюється. Зміну блиску таких метеорів досить важко пояснити дробленням.

У роботі [37] наводяться вибіркові результати спостережень метеорів, отриманих за допомогою Канадського спостережного комплексу CAMO, зокрема 21 метеора з явно вираженою бімодальною кривою блиску. Більшість таких кривих блиску складається з першого плавного піку та другого яскравішого й дуже різкого. Для моделювання таких кривих блиску автори використовують модель пилової кулі (dustball model), спочатку розроблену в [38], а потім удосконалену для двокомпонентного тіла в [39]. Розглядалась ситуація, коли деяка частина тугоплавкої компоненти вже відділилася від основного тіла до початку інтенсивного випаровування. Оптимальна, хоча й не ідеальна, апроксимація кривої блиску відбувається при масі попередньо звільнених частинок 10^{-9} кг та 10^{-6} кг тих, які залишились в "склеєному" стані на початок абляції.

У даній роботі пропонується до розгляду метеор з явно вираженою бімодальною кривою блиску, що належав до потоку Персеїд і спостерігався в 1991 у Києві, і набір якісних моделей для його опису.

Результати спостережень. Під час спостережень у 1991 р. метеорного потоку Персеїди було зареєстровано кілька метеорів з коливаннями в кривій блиску [17, 18]. При цьому один метеор демонстрував коливання в кривій блиску, типові для моделі дроблення тіла (рис. 1). Варіюючи кількість та масу частинок, що відділяються від основного тіла, і швидкість їх відділення, тобто параметри дроблення, можна легко змоделювати таку криву блиску.

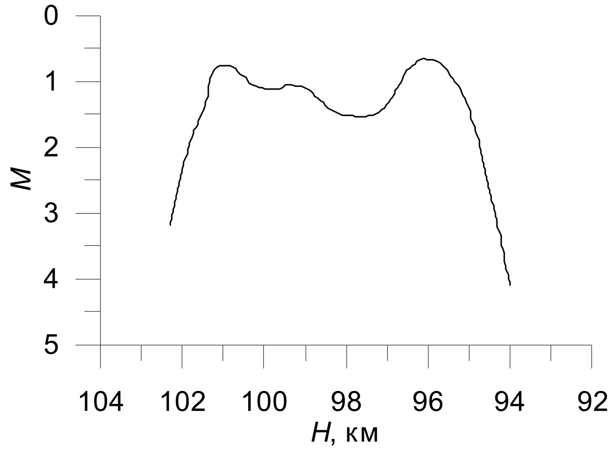

Рис. 1. Незначні коливання інтенсивності випромінювання у кривій блиску метеора (Персеїд, 1991), які можна пояснити дробленням тіла

Даний метеор мав передатмосферну швидкість $\upsilon_\infty = 62.35$ км/с, початкову та кінцеву висоти $H_b = 102.2$ та $H_e = 94.0$ км, відповідно, і був середньої яскравості: абсолютна зоряна величина в максимумі $M = 0.5^m$, маса $m = 8.5\times10^{-6}$ кг.

Однак інший метеор мав явно виражену бімодальну криву блиску, причому був зареєстрований і опрацьований за обома пунктами спостереження майже на всій ділянці (за винятком самого початку) його траєкторії. На рис. 2 наведені його зображення в окремих кадрах з обох пунктів спостереження (А – с. Лісники, В – с. Пилиповичі) і крива його блиску, також побудована за двома пунктами. При спостереженнях використовувались надчутливі телевізійні системи типу суперізокон, які, однак, мають довге післясвічення на мішені передавальної телевізійної трубки. Саме цим пояснюється існування в окремих вибраних кадрах майже всього інтегрального зображення метеора. Утім, порівнюючи зображення в кадрах і побудовану криву блиску, можна зауважити, що перший пік на зображеннях уже дещо зменшився відносно другого, отже, зображення не відображають строго фотометричну картину метеора в розвитку. Отримані видимі зоряні величини M_{vis} метеора за обома пунктами переводилися в абсолютну зоряну величину M (на відстань 100 км) за відомою формулою

$$M = M_{vis} + 10 - 5\lg R,$$

де R виражено в км. На рис. 2 світлі кружки відповідають вимірам за пунктом А, чорні – за пунктом В. Суцільна крива отримана шляхом "зшивання" двох апроксимуючих поліномів 5-го та 3-го степеня. Як видно з рис. 2, на жаль, перший пік кривої блиску, що має максимум на висоті близько 105 км, не повністю потрапив у поле зору, так само як і початок метеора.

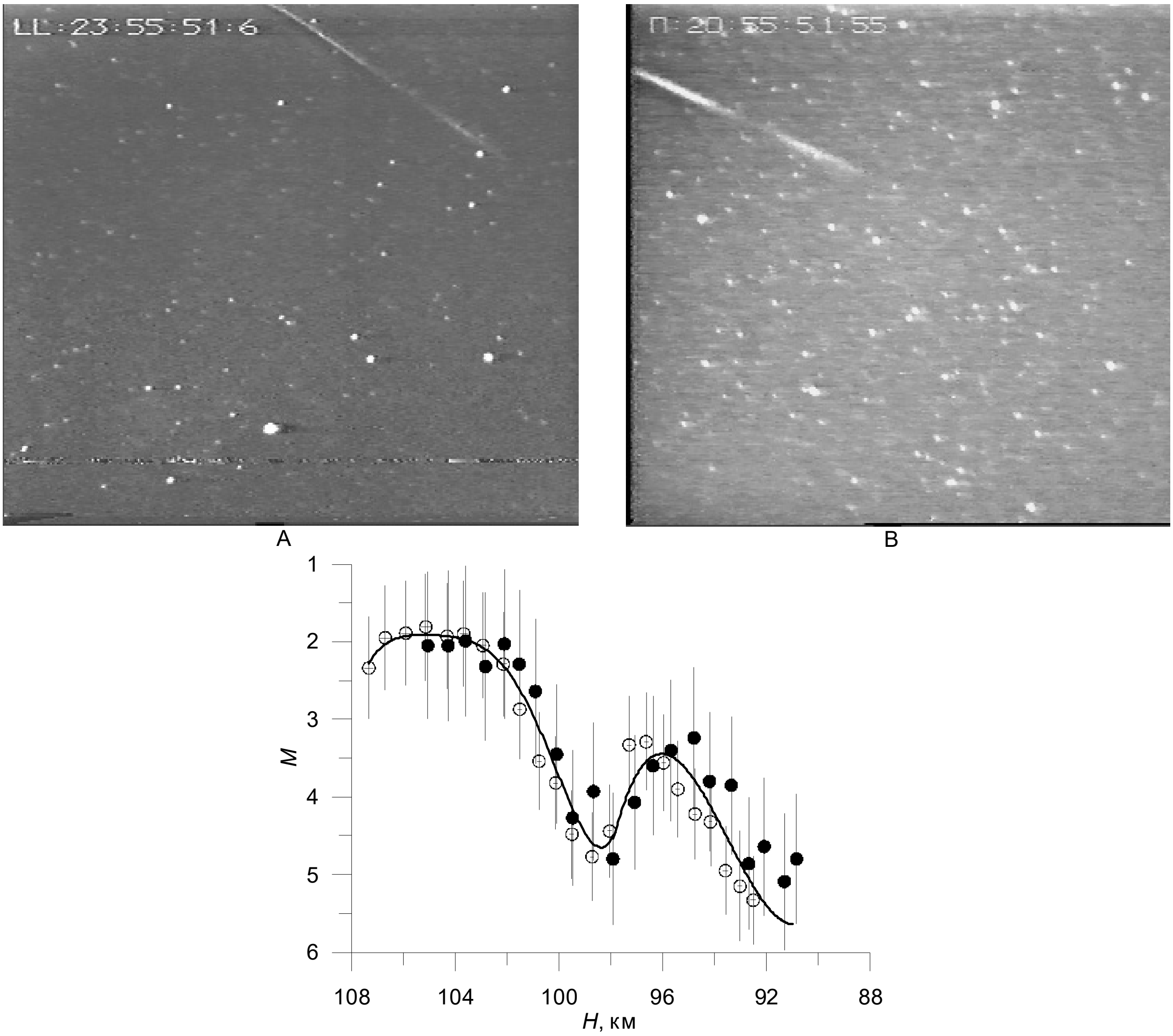

Рис. 2. Бімодальна крива блиску метеора з потоку Персеїди, зареєстрованого 14 серпня 1991 р., $UT = 20:55:51$. Білі кружки – пункт А, чорні – пункт Б

Кінематичні параметри метеора наведені в табл. 1, а саме: висоти H появи та зникнення, видима довжина траєкторії L та час існування t, зенітний кут входження метеороїда в атмосферу Z_R; модулі швидкості υ та екваторіальні координати α, δ видимого vis, передатмосферного ∞, геоцентричного g та геліоцентричного h радіантів; елементи геліоцентричної орбіти метеороїда: a – велика піввісь орбіти, e – ексцентриситет, i, ω, Ω – нахил, аргумент перигелію та висхідний вузол орбіти, відповідно (усі кутові елементи наведено на епоху J2000.0).

Таблиця 1

Кінематичні характеристики метеора з бімодальною кривою блиску

		Траєкторія		
H_b, км	H_e, км	L, км	t, с	Z_R, °
>105.01	89.45 ± 0.12	>27.98	>0.49	53.67 ± 0.41
		Радіант та швидкість		
	vis.	∞	g	h
α_R, °	52.11 ± 0.73	52.27 ± 0.74	53.10 ± 0.74	139.23 ± 6.14
δ_R, °	60.89 ± 0.25	61.13 ± 0.25	60.79 ± 0.26	87.79 ± 0.53
υ, км/с	58.56 ± 0.36	58.42 ± 0.36	57.36 ± 0.36	40.84 ± 0.40
		Орбіта		
a, а.о.	e	i, °	ω, °	Ω, °
10.67 ± 4.22	0.91 ± 0.03	109.03 ± 0.23	145.51 ± 1.72	141.83321 ± 0.00001

За всіма ознаками даний метеор – типовий Персеїд. Максимум блиску в першому пікові становив $+2^m$, у другому $+3.5^m$, а в депресії $+4.5^m$, що майже відповідає фонові неба. Як видно з рис. 2, чутливість спостережної апаратури обмежувалася $+5.5^m$, тим не менш повного зникнення світіння не відбулося. За формою бімодальної кривої блиску метеор не підпадає під основну частину описаних у [37], а має протилежний вигляд – перший пік інтенсивний, а другий слабкий. Проведемо якісний аналіз можливих моделей внутрішньої будови метеороїда та розвитку відповідного метеора.

Якісний аналіз і можливі моделі метеора. У роботі [37] авторами згадується, що найпростішим поясненням бімодальних кривих блиску могли б служити дві частинки, які не розділяються апаратурою. Однак ними ж приймається версія пилової кулі, де є багато частинок двох різних за розмірами й масою типів, "склеєних" більш летючою речовиною на зразок льоду. Ми не будемо розглядати аналогічну модель, оскільки, по-перше, вона вже детально розроблена в [38, 39] та [37], а по-друге тому, що така модель має досить багато степенів вільності, тобто параметрів, зміною яких можна коригувати поведінку тіла, що в природі навряд чи має місце. У даній роботі ми розглянемо якісно лише найпростіші моделі, які могли б описати такі бімодальні криві блиску. У такому моделюванні, крім простоти будови тіла (або тіл), будемо зважати на фізичну можливість існування в природі даного утворення. Загалом будемо розглядати два типи метеороїдів, у яких у першому випадку причиною двох піків на кривій блиску є двокомпонентний склад космічної частинки, а в іншому – частинка передбачається однорідною та монолітною, а причиною бімодальності кривої блиску є геометрична форма метеороїда.

Композитний метеороїд із двох компонент. Як уже згадувалося, найпростіший випадок спостереження бімодальної кривої блиску – паралельний політ на дуже маленькій відстані двох різних частинок, наприклад кам'яної та частинки з льоду. У випадку нашої спостережної апаратури кутовий розмір пікселя становить 4', що на відстані 100 км відповідає приблизно 115 м. Отже, такі дві частинки мають рухатися на відстані приблизно такого самого порядку й тоді будуть сприйняті спостережною апаратурою як одна. Варіюючи їхні маси, форми тіл і густину, можна підібрати таку поведінку їхніх кривих блиску, яка б при їх складанні забезпечила бімодальний вигляд інтегральної кривої (рис. 3 а). Слід зауважити, що досить легко підібрати параметри таких частинок для випадку, коли перший пік малий за інтенсивністю, а другий – більший, як було описано в [37]. У протилежному випадку, тобто такому, який наведено на рис. 2, підібрати дві частинки, які б забезпечили дуже мале світіння в депресії інтегральної кривої, досить важко – значно простіше змоделювати ситуацію, де глибина депресії буде незначна, тобто криві блиску двох частинок суттєво перекриваються. Причина тут очевидна – більш легкоплавка частинка має встигнути досягти температури кипіння та повністю випаруватися, поки інша ще не досягла своєї температури інтенсивного випаровування, а можливо, лише температури плавлення, адже незначне світіння вже можливе для її детектування й у цьому випадку. Іншою проблемою такої моделі є факт існування на малій відстані двох частинок протягом тривалого часу – від локального руйнування частини кометного ядра. У цьому випадку значно легше припустити руйнування такого кам'яно-льодового метеороїда безпосередньо перед чи при вході в земну атмосферу.

Інші, реалістичніші щодо можливості існування варіанти такої моделі наведені на рис. 3 б та 3 в. У першому випадку (рис. 3 б) більш тугоплавка – кам'яна або залізна – частинка покрита шаром більш легкоплавкої, наприклад льодово-пилової суміші.

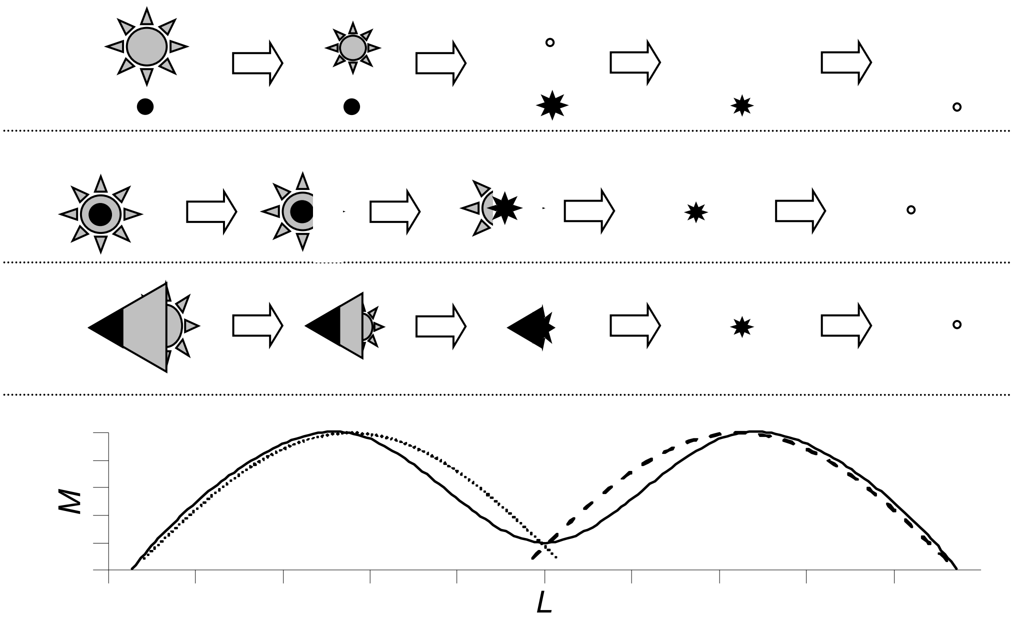

Рис. 3. Різні варіанти двокомпонентної структури метеороїда, яка може спричинити бімодальну криву блиску:
а – незв'язані частинки, що рухаються паралельно, причому легкоплавка частинка практично повністю випаровується до початку абляції тугоплавкої частинки; *б* – тугоплавка частинка покрита шаром легкоплавкої, яка спочатку випаровується, а потім відкриває шлях для нагрівання й випаровування тугоплавкої; *в* – уламок більшої за розміром частинки, яка також складалася з більш тугоплавкого ядра та менш тугоплавкої периферії – розвиток ситуації аналогічний попередньому випадку; схематична крива блиску метеора, яка, по суті, є композицією двох незалежних кривих блиску

Співвідношення розмірів частинок, їхні внутрішні характеристики та кут входження в атмосферу можна варіювати в певних межах довжини (час існування) першого та другого піків. Наприклад, (див. рис. 3 а), для того, щоб отримати повністю розривну криву блиску метеора, при такому варіанті необхідно, щоб легкоплавка частинка випарувалася повністю до початку світіння тугоплавкої – інакше світіння повністю не припиниться. Аналогічна ситуація для моделі, зображеної на рис. 3 б – метеор буде продовжувати світитися в мінімумі, оскільки внутрішня частинка вже буде відкрита набігаючому потокові повітря, а зовнішня все ще продовжуватиме випаровуватись. Слід зауважити, що ситуація може дещо або суттєво змінитись при швидкому обертанні такої сферичної частинки. У цьому випадку випаровування поверхні може йти рівномірно або майже рівномірно, і при достатньо низькому коефіцієнтові теплопровідності зовнішнього шару той може повністю випаруватися, не передавши достатньо енергії внутрішній частинці, – тоді вона зустрінеться з молекулами повітря, будучи доволі холодною.

Випадок, зображений на рис. 3 в, аналогічний попередній ситуації, але обидві складові є уламком більш крупної частинки, що спочатку мала сферичну (або схожу) форму. Відмінністю такої конфігурації відносно попередньої є очевидність екранування внутрішньої тугоплавкої складової поверхневою речовиною до повного її випаровування, оскільки така геометрія тіла буде створювати стійкий його рух в атмосфері. Хотілося б зауважити, що ідентифікація такої двокомпонентної моделі метеороїда може бути легко реалізована за допомогою паралельних спектральних спостережень за умови, що метеор достатньо яскравий.

Монолітний однорідний метеороїд неправильної форми. Незважаючи на очевидну складність можливої реалізації кількісного аналізу наведених вище моделей (через малу кількість у них варіативних параметрів), усе ж видається доцільним побудувати в перспективі відповідні кількісні моделі. Однак ще складнішим видається спроба пояснити бімодальні криві блиску за допомогою моделі руху однорідного монолітного тіла. Проте можна уявити тіла неправильної геометричної форми, які через цю свою особливість або додатково через раптову зміну їхньої орієнтації під час руху в атмосфері змогли б зумовити такі специфічні криві блиску.

Найпростішим варіантом є частинка, яка обертається, і при цьому в певному положенні її мідель має дуже мале значення. Найочевидніша форма – форма монети (рис. 4 а). Перший пік у кривій блиску досягається, коли частинка повертається поверхнею перпендикулярно до напрямку руху, а мінімум – відповідно коли вона летить "ребром монети" уперед. Другий максимум пов'язаний лише частково з перпендикулярною орієнтацією частинки, а більше із завершенням випаровування в густіших шарах атмосфери. Певним недоліком такої моделі є той факт, що можливість і швидкість обертання будуть сильно залежати від маси, розміру та швидкості руху космічної частинки через велике аеродинамічне навантаження при зустрічі з атмосферою планети, особливо у відносно густих шарах атмосфери. Адже, очевидно, стійким положенням частинки є її орієнтація, коли її поверхня перпендикулярна до напрямку руху, і щоб здійснити поворот, метеороїд повинен мати достатній обертальний момент.

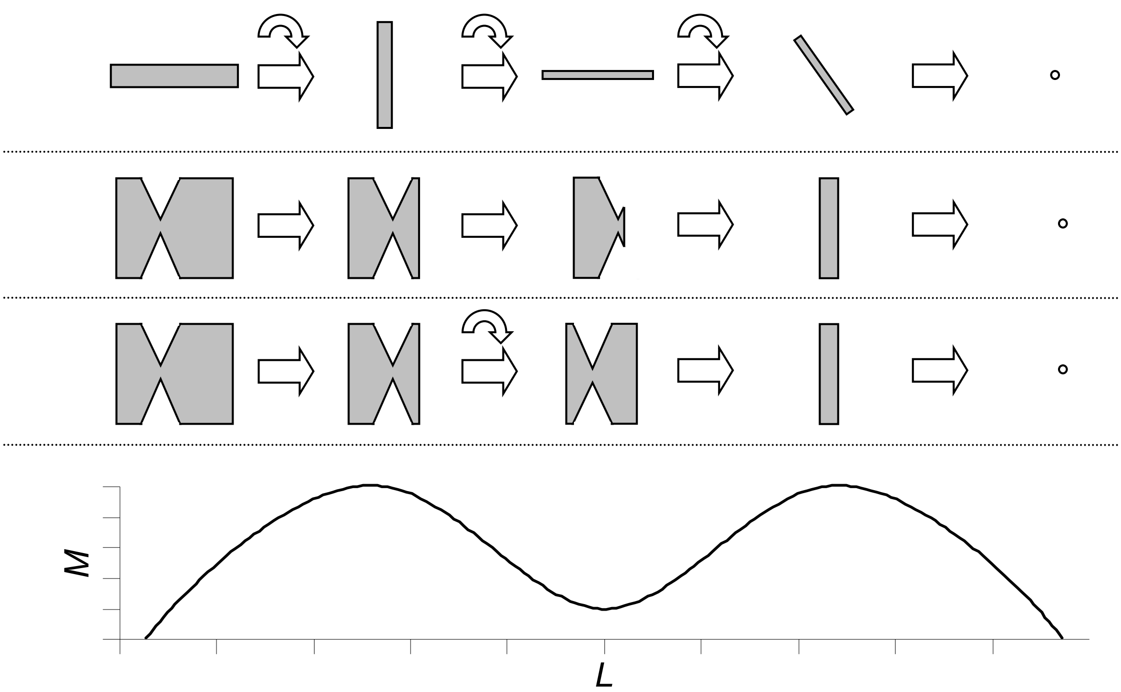

Рис. 4. Різні варіанти форми та руху монолітного метеороїда однорідної структури, яка може спричинити бімодальну криву блиску:
а – плоский монетоподібний метеороїд, що обертається, – мінімум блиску зумовлений мінімальним міделем частинки; *б* – циліндричний гантелеподібний метеороїд, у якого задня частина певний час повністю екранується передньою; *в* – метеороїд, аналогічний *б*, але коли депресія блиску зумовлена його одноразовим обертанням на 180°, викликаним поступовим зміщенням центра мас; схематична крива блиску, що відображає зміну орієнтації частинки протягом польоту

На рис. 4 б схематично зображений циліндричний гантелеподібний метеороїд, що складається із різних за поздовжнім розміром частинок, які з'єднані вузьким "перешийком". Метеороїд спочатку має рухатися більшою частиною вперед – такий рух буде стійким через те, що центр мас ближчий до фронтальної частини. Ще однією умовою стійкого руху є значно більший поперечний розмір кожної з частин тіла, ніж поздовжній (тобто діаметр циліндрів більший ніж їхня довжина). Передній і задній циліндри мають або однаковий радіус, або передній більший – це забезпечує повну екранізацію задньої частини метеороїда. А вузький з'єднуючий "міст" має порівняно малий діаметр, що мінімізує передавання тепла до задньої частини, особливо при низькому коефіцієнті теплопровідності речовини. По мірі випаровування передньої циліндричної частини інтенсивність блиску метеороїда буде зростати лише за рахунок збільшення густини атмосфери, адже мідель циліндричного метеороїда не змінюється. При наближенні фронтальної поверхні частинки до "перешийку", що з'єднує передню та задню частини тіла, еволюція метеора може йти двома шляхами. У першому випадку (рис. 4 б) передня частина досить швидко зникає повністю, оголюючи практично холодну задню частину метеороїда. Крива блиску при цьому має мінімум (або світіння зникає зовсім), а далі починається фаза нагрівання та випаровування задньої частини тіла, яка має проходити значно інтенсивніше, оскільки відбувається в нижчих, густіших шарах атмосфери.

Дещо інший варіант розвитку подій – коли по мірі випаровування передньої частини тіла центр мас метеороїда зміщується в задню частину тіла, за "перешийок". У цьому випадку рух може стати нестійким і з'явиться обертальний момент, який, у свою чергу, зумовить розворот тіла на 180°. З початком і протягом розвороту тіло буде орієнтуватися своїми відносно холодними частинами (задня частина буде майже повністю холодна, але бокова поверхня передньої частини – ні) уперед, що спричинить депресію в кривій блиску метеора. Глибина депресії залежить від деталей геометричної форми тіла.

Висновки. Запропоновані тут моделі форми, складу та фізичних властивостей метеороїдів і деяких особливостей їхнього руху є найпростішими з тих, що претендують на пояснення бімодальних кривих блиску, що іноді спостерігаються в метеорах. На відміну від описаних у [38, 39] та [37], такі моделі мають мінімум варіативних параметрів, і за можливості коректного підбору цих параметрів під час кількісного аналізу згадані моделі зможуть претендувати на вищу ймовірність реалізації в природі. Проте слід зауважити, що такі якісні моделі оперують дуже схематичними геометричними конфігураціями метеороїдів, як монолітних, так і двокомпонентних. При кількісному аналізі та відповідному числовому моделюванні слід буде розглядати не лише такі ідеалізовані, а й природніші форми тіл та їхні композиції. Також нагадаємо, що, імовірно, крапкою у виборі фізичної моделі, яка надійно описує бімодальну криву блиску метеора, буде успішна реалізація паралельних спектральних спостережень.

Список використаних джерел

1. Jopek T.J. Current status of the~IAU MDC Meteor Showers Database : Proc. Astron. Conf. Meteoroids, 2013 / T. J. Jopek, Z. Kanuchova ; eds. : T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. – Poznan (Poland) : A. M. Univ. Press, 2014. – P. 353–364.
2. Svoren J. Current status of the photographic meteoroid orbits database and a call for contributions to a new version / J. Svoren, V. Porubcan, L. Neslusan // Earth, Moon, and Planets. – 2008. – 102. – 1-4. – P. 11–*14.
3. SonotaCo A meteor shower catalog based on video observations in 2007–2008 // WGN, the Journal of the IMO. – 37:2. – 2009. – P. 55–56.
4. Taylor A. D. Discovery of interstellar dust entering the Earth's atmosphere / A. D. Taylor, W. J. Baggaley, D. I. Steel // Nature. – 1996. – 380. – 6572. – P. 323–325.
5. Baggaley W. J. Advanced Meteor Orbit Radar observations of interstellar meteoroids / W. J. Baggaley // Journal of Geophysical Research. – 2000. – 105, A5. – P. 10353–10361.
6. Hawkes R. Optical detections of two meteoroids from interstellar space / R. Hawkes, S. Woodworth // Journal of the Royal Astron. Soc. of Canada. – 1997. – 91. – P. 218–219.
7. Hawkes R. Meteoroids from outside the solar system / R. Hawkes, T. Close, S. Woodworth // Proc. Int. Conf. Meteoroids 1998 / eds. W. J. Baggaley, V. Porubcan. – Tatranska Lomnica, Slovakia, 1999. – P. 257–264.
8. Kinoshita M. Preliminary activity of Leonid meteor storm observed with a video camera in 1997 / M. Kinoshita, T. Maruyama, T. Sagayama // Geophysical Research Letters. – 1999. – 26, 1. – P. 41–44.
9. Meteoroid clusters in Leonids: evidence of fragmentation in space / J. Watanabe, I. Tabe, H. Hasegawa et al. // Publ. Astron. Soc. in Japan. – 2003. – 55, 3. – P. L23–L26.
10. Ceplecha Z. Earth-grazing daylight fireball of August 10, 1972 / Z. Ceplecha // A&A. – 1994. – 283. – P. 287–288.
11. Borovička J. Earth-grazing fireball of October 13, 1990 / J. Borovička, Z. Ceplecha // A&A. – 1992. – 257. – P. 323–328.
12. Meteor Network Team in Japan Earth-grazing fireball on March 29, 2006 / S. Abe, J. Borovička, P. Spurný et al. // European Planet. Sc. Cong. 2006, Berlin, Germany. – 2006. – P. 486.
13. Earth-grazing fireball from the Daytime ζ-Perseid shower observed over Spain on 2012 June 10 / J. M. Madiedo, F. Espartero, A. J. Castro-Tirado et al. // MNRAS. – 2016. – 460, 1. – P. 917–922.
14. Kozak P. M. Upward-moving low-light meteor – I. Observation results / P. M. Kozak, J. Watanabe // MNRAS. – 2017. – 467, 1. – P. 793–801.
15. Козак П. Дотичні до земної атмосфери метеори / П. Козак // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2017. – 1 (55). – С. 48–51.
16. Козак П. М. Метеори з аномальними висотами появи за телевізійними спостереженнями в Києві / П. М. Козак // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2017. – 2 (56). – С. 6–9.
17. Perseid meteor stream 1991-1993 from TV observations in Kiev / M. Hajdukova, V. G. Kruchinenko, A. M. Kazantsev et al. // Earth, Moon and Planets. – 1995. – 68. – 297–301.
18. Catalogue of Perseid shower meteors on TV observations in Kyiv during 1991-1993 / V. G. Kruchinenko, A. M. Kazantsev, Yu. G. Taranukha et al. // Bull. Kiev Univ. Astronomy. – 1997. – 34. – P. 94–117.
19. Meteor luminosity at 160 km altitude from TV observations for bright Leonid meteors / Y. Fujiwara, M. Ueda, Y. Shiba et al. // Geophys. Resуфкср Letters. – 1998. – 25, 8. – P. 285–288.
20. Very precise orbits of 1998 Leonid meteors / H. Betlem, P. Jenniskens, J. Leven et al. // Meteoritics and Planetary Science. – 1999. – 34. – P. 979–986.
21. Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the thirteen brightest photographic Leonid meteors from the ground based expedition to China / P. Spurny, H. Betlem, J. V. Leven, P. Jenniskens // Meteoritics and Planetary Science. – 2000. – 35. – P. 243–249.
22. Image-intensified video result from the 1998 Leonid shower: I. Atmospheric trajectories and physical structure / M. D. Campbell, P. G. Brown, A. G. LeBlanc et al. // Meteoritics and Planetary Science. – 2000. – 35. – P. 1259-1267.
23. Extreme beginning heights for non-Leonid meteors / P. Koten, P. Spurny, J. Borovicka, R. Stork ; ed. Barbara Warmbein. – ESA SP-495. – Noordwijk: ESA Publications Division. – 2001. – P. 119–122.
24. Gaehrken B. A bright, high altitude 2002 Leonid / B. Gaehrken, J. Michelberger // WGN, the journal of the IMO. – 2003. – 31:5. – P. 137–138.
25. The beginning heights and light curves of high-altitude meteors / P. Koten, P. Spurny, J. Borovicka et al. // Meteoritics and Planetary Science. – 2006. – 41, № 9. – P. 1305–1320.
26. Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv / P. Kozak, O. Rozhilo, V. Kruchynenko et al. // Adv. Space Res. – 2007. – 39. – 4. – P. 619–623.
27. PF191012 Myszyniec – highest Orionid meteor ever recorded / A. Olech et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2013. – 557. – A89. – P. 1-5.
28. Bright Perseid fireball with exceptional beginning height of 170 km / P. Spurny, L. Shrbeny, J. Borovicka et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2014. – 563. – A64. – P. 1–6.
29. New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km / P. Spurny, H. Betlem, K. Jobse et al. // Meteoritics and Planetary Science. – 2000. – 35. – P. 1109-1115.
30. Popova O. P. Sputtering of fast meteoroids' surface (2007) / O. P. Popova, A. S. Strelkov, S. N. Sidneva // Adv. Sp. Res. – 39, 4. – P. 567–573.
31. Stenbaek-Nielsen H. C. "Shocking" Leonid meteor at 1000 fps / H. C. Stenbaek-Nielsen, P. A. Jenniskens // Adv. Space Res. – 2004. – 33. – P. 1459–1465.
32. Evidence for transverse spread in Leonid meteors / A. G. LeBlanc, I. S. Murray, R. L. Hawkes et al. // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2000. – 313. – P. L9-L13.

33. Jet-like structures and wake in Mg I (518 nm) images of 1999 Leonid storm meteors / M. J. Taylor, R. C. Gardner, I. S. Murray, P. Jenniskens // Earth, Moon, and Planets. – 2000. – 82–83. – P. 379–389.

34. SuprimeCam Observation of Sporadic Meteors during Perseids 2004 / M. Iye, M. Tanaka, M. Yanagisawa et al. – PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan. – 2007. – 59. – P. 841–855.

35. Gorbanev Y. M. Odessa television meteor patrol // Odessa Astron. Publ. – 2009. – Vol. 22. – P. 60–67.

36. Stokan E. Transverse motion of fragmenting faint meteors observed with the Canadian Automated Meteor Observatory / E. Stokan, M. D. Campbell-Brown // Icarus. – 2014. – 232. – P. 1–12.

37. Meteoroid structure and ablation implications from multiple maxima meteor light curves / I. D. Roberts, R. L. Hawkes, R. J. Weryk et al. // Proc. Meteoroids 2013 / eds. : T. J. Jopek, F. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. – 2014. – P. 155–162.

38. Jacchia L. G. The Physical Theory of meteors. VIII. Fragmentation as cause of the faintmeteor anomaly / L. G. Jacchia // AJ. – 1955. – Vol. 121. – P.521.

39. Hawkes R. L. A quantitative model for the ablation of dustball meteors / R. L. Hawkes, J. Jones // MNRAS. – 1975. – Vol. 173. – P. 339–356.

П. Козак, канд. физ.-мат. наук,
Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев

МЕТЕОРЫ С МУЛЬТИМОДАЛЬНЫМИ КРИВЫМИ БЛЕСКА: НАБЛЮДЕНИЯ И КАЧЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ

Рассматривается проблема телевизионной регистрации метеоров с аномальными кривыми блеска, в частности с мультимодальными и бимодальными их типами. Приводятся результаты наблюдений двух метеоров из потока Персеид, полученные с помощью телевизионных систем типа суперизокон. Одна из кривых блеска имеет мультимодальный характер и может быть объяснена дроблением тела, другая принадлежит к явно выраженному бимодальному типу, который не имеет на сегодняшний день окончательного объяснения. Предлагаются качественные модели для интерпретации метеора с бимодальной кривой блеска. Одна из них предусматривает двокомпонентный состав метеороида, когда тело, по сути, состоит из двух частей. Другой вариант – однородный монолитный метеороид со специфической геометрической формой и параметрами возможного вращения тела. Предложенные модели являются простейшими по количеству варьируемых параметров и могут претендовать на достоверность при успешном проведении количественного анализа. Отмечено, что окончательно подтвердить или опровергнуть тип модели можно только при проведении параллельных спектральных наблюдений метеоров.

Ключевые слова: метеоры, видеонаблюдение метеоров, аномальные метеоры, фотометрия, кривые блеска метеоров, физическая модель движения метеора в атмосфере, качественный анализ результатов наблюдений.

P. Kozak, PhD,
Astronomical Observatory,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

METEORS WITH MULTI-MODAL LIGHT CURVES: OBSERVATIONS AND QUALITATIVE MODELS

The problem of TV or video registration of meteors with anomalous light curves, in particular with multimodal and bimodal types is considered. The results of observations of two meteors from Perseid shower, obtained with the help of TV systems of super-isocon type are presented. The initial velocities of meteors were typical for Perseid shower meteors: 62.4 km/s and 58.4 km/s. One of the meteors has a light curve of a multimodal character, which can be explained by the fragmentation of the body. Another light curve has an evident bimodal type, which has no final explanation for the present. In opposite to most of registered for the moment meteors with bimodal light curves the given meteor from Perseid shower demonstrates the first peak of illumination to be much more intensive, and the second one to be significantly lower. The maximal brightness in the first peak was +2 magnitude, in the second one +3.5 magnitude, and in depression +4.5 magnitude which almost corresponds to the sky background, while the sensitivity of our observational instruments was +5.5 magnitude; but nevertheless the entire radiation disappearance was not happen. The qualitative models for interpretation of the meteor with bimodal light curve are proposed. One of them stipulates for different variants of realization of the 2-components composition of a meteoroid, when a body as the matter of fact consists of two particles. One of particles, inner as a rule, is high melting, for example a stone of iron; another one, the cover, is lower melting, for example a mix of dust and ice. Other types of the models use the cases of uniform monolith meteoroid of specific geometric shape. It is also intended that the meteoroid can rotate during its motion dependently on changing body shape or shifting its mass center. The proposed models are the simplest in accordance with the number of varying parameters, and can therefore pretend to their reality after successful application of quantitative analysis and according numerical modeling. It is noted that the final confirmation or abolishment of the model type will be possible after carrying out parallel spectral observations of meteors.

Key words: meteors, video observations of meteors, anomalous meteors, photometry, meteors brightness curves, physical model of meteor motion in the atmosphere, quality analysis of observations results.