

<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.085>
УДК 523.68, 52.121, 52.13, 52.323.2

П. М. КОЗАК¹, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
E-mail: kpm@knu.ua

Ю. Є. ЗЛОЧЕВСЬКИЙ², спостерігач

Л. В. КОЗАК³, доцент, канд. фіз.-мат. наук

С. В. СТАРИЙ⁴, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

¹ Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053

² Київський астрономічний клуб «Астрополіс»

³ Фізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Проспект Академіка Глушкова 4, Київ, Україна, 03680

⁴ Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України
Проспект Науки 41, Київ, Україна, 03028

ПРОБЛЕМИ ОБРОБКИ ВІДЕОЗАПИСІВ ЯСКРАВИХ БОЛІДІВ ТА ПАДАЮЧИХ ЗАЛИШКІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ, ЗАРЕЄСТРОВАНІХ МАЛОЧУТЛИВИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДЕОКАМЕРАМИ У СКЛАДНИХ СПОСТЕРЕЖНИХ УМОВАХ

Приводиться методика кінематичної і фотометричної обробки результатів односторонніх відеоспостережень унікального яскравого боліда (або уламка космічного апарата) проведених в надзвичайно складних спостережних умовах. Через низьку чутливість відеокамери і наявність значної кількості зіркоподібних артефактів на матриці камери та сильну завітку кадру яскравим Місяцем (-10.95^m), який перебував безпосередньо у полі зору камери, в усіх кадрах були повністю відсутні зорі. Застосування алгоритмів усереднення та сумування до кадрів в цілому, та виведення на екран окремих динамічних діапазонів інтенсивності зображення дозволило відшукати та ототожнити 45 опорних зірок, найслабші з яких мали блиск $5.4^m \dots 5.7^m$. Завдяки наявності у полі зору камери точки максимального зближення траєкторії об'єкта із спостерігачем, яка відповідає максимуму кутової швидкості, та моделюванню було отримано максимально можливу кількість параметрів космічного тіла, які можна отримати з односторонніх спостережень. Об'єкт рухався більш ніж 12 с, кутова довжина траєкторії перевищувала 60° , максимальна кутова швидкість в точці максимального зближення із спостерігачем становила $7.4^\circ/\text{с}$. Показано, що космічне тіло від початку свого руху до точки максимального зближення могло втратити приблизно 32 % початкової швидкості. Наявність в кадрі точки максимального зближення дозволило коректно обчислити пряме сходження та схилення видимого радіанта об'єкта як 272.0° та -0.8° відповідно. Блиск космічного тіла варіював у межах $-5.5^m \dots -8.5^m$. Усі проведені обчислення не дозволили однозначно ідентифікувати об'єкт як метеороїд чи уламок космічного сміття.

Ключові слова: метеор, метеорний потік, болід, космічне сміття, параметри траєкторії метеора, фотометрія.

Цитування: Козак П. М., Злочевський Ю. Є., Козак Л. В., Старий С. В. Проблеми обробки відеозаписів яскравих болідів та падаючих залишків космічних апаратів, зареєстрованих малочутливими побутовими відеокамерами у складних спостережних умовах. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 6 (133). С. 85—97. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.085>

ВСТУП

Спостереження метеорів, початкова астрометрична обробка спостережних даних та відновлення параметрів траєкторії метеора в атмосфері Землі, як і побудова кривої блиску з висотою та часом є на сьогодні хоча і достатньо відпрацьованою задачею, та в ряді випадків зустрічається із значними ускладненнями. Так, ніколи не відомо, в якій частині кадру (при відеозйомках) пролетить метеор, і чи буде достатньо опорних зірок та зірок порівняння навколо його зображення для коректної астрометричної та фотометричної обробки. Для яскравих болідів виникає проблема відтворення кривої блиску в абсолютних зоряних величинах через відсутність світних об'єктів порівняння у кадрі. Також, незважаючи на відносно велику кількість спостережних мереж, реєстрація потужних болідів (а особливо над'яскравих болідів типу Челябінського, що можуть становити загрозу для людства), є досить рідкісним явищем. Очевидно, що навіть випадкова реєстрація потужного боліда заслуговує на максимально детальну обробку спостережних даних з метою відновлення максимально можливої кількості інформації про космічне тіло, зокрема про можливість його належності до якогось метеорного потоку. Схожа ситуація і з відеоспостереженнями падаючих уламків космічних апаратів, космічного сміття та ін. В ряді випадків на допомогу дослідникам метеорів можуть прийти любителі метеорної астрономії, які проводять епізодичні чи регулярні відеоспостереження.

Користь від участі аматорів у сучасній спостережній метеорній астрономії є незаперечною. Багато любителів та організованих спостережних метеорних мереж проводять як класичні базисні (або односторонні) відеоспостереження, так і спектральні спостереження [21, 19]. Метеорна аматорська мережа Японії [21] функціонує уже більше десяти років. Використовуються сучасні достатньо чутливі відеокамери «Watec WAT-100N» та «WAT-902H2 Ultimate», оснащені фотографічними об'єктивами, що забезпечують поле зору порядку $55^\circ \times 45^\circ$. Для захоплення зображень метеорів з аналогових відеокамер «Watec», як і для обробки та аналізу параметрів

траєкторій та орбіт використовується їхнє власне програмне забезпечення [20]. Щороку, починаючи з 2007 р., кількість опрацьованих метеорів варіює приблизно у межах 15000...25000. Інша, європейська об'єднана мережа аматорів та професіоналів [19], крім панорамних відеоспостережень проводить також спектральні спостереження на достатньо високому рівні. Як правило, усі аматорські метеорні мережі в тій чи іншій мірі пов'язані з професійними науковими інституціями, і є по суті деяким спільним колективом для метеорних досліджень.

Настільки активному розвитку метеорної аматорської астрономії сприяло кілька факторів. По-перше, це розвиток електроніки, зокрема суттєве подешевшення спостережних відеокамер, які стали доступними пересічним громадянам. Наприклад, камери «Watec», які є варіантом охоронних систем, і дійсно чутливіші, ніж інші охоронні камери, так що можуть використовуватися у темний час доби, коштують на сьогодні близько \$500. По-друге, це розвиток комп'ютерної техніки, який дозволяє аматорам метеорної астрономії проводити класичну обробку спостережень в домашніх умовах. По-третє — це поява та розвиток інтернету, який дозволяє ефективно акумулювати результати спостережень у міжнародні бази даних та робити їх доступними для будь-якого користувача.

Тим не менш, навіть ціна в \$500 на сьогодні не є вже такою й малою — тому часто аматори метеорної астрономії з метою економії використовують значно дешевшу відеотехніку (охоронні відеокамери та відеореєстратори). Такі малочутливі камери мають ту перевагу, що забезпечують, як правило, дуже велике поле зору — іноді порядку 100° , що збільшує імовірність реєстрації яскравих метеорів у рази. Однак така ситуація призводить до певної проблеми: зростання поля зору, з одного боку, призводить до суттєвого збільшення зареєстрованих болідів, однак з іншого боку не надає змоги провести достатньо якісну (а іноді взагалі будь-яку) обробку спостережного матеріалу через малу кількість чи взагалі відсутність зірок у кадрі — дана ситуація типова для побутових охоронних камер, які мають короткий фокус і відповідно малу вхідну

апертуру. Таким чином, спостереження з такою апаратурою можуть допомогти в задачі статистичного визначення інтенсивності притоку відносно крупної метеорної речовини на Землю, однак не завжди дають змогу надійно визначити параметри траєкторії болідів та елементів їхніх геліоцентричних орбіт, що є вкрай важливим для вивчення метеорної складової Сонячної системи.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ БОЛІДА АМАТОРАМИ ТА ПРОБЛЕМА ОБРОБКИ ДАНИХ

Ідеєю написання даної роботи послугувався відеозапис унікального боліда, здійснений співавтором даної роботи та членом Київського астрономічного клубу «Астрополіс» у м. Вишневе біля Києва. Відеозапис даного боліда можна побачити на інтернет-сервісі YouTube [22]. Для спостережень використовувалася камера VE-6047EF (1/3") — її параметри приведено в таблиці.

Болід пролетів майже горизонтально через увесь кадр за час близько 12 с, тобто був надзвичайно повільним, але в той же час дуже яскравим, та мав ряд цікавих фотометричних особливостей, таких як деформація форми коми, відділення фрагментів тощо. З іншого боку, це могли бути і залишки космічного апарата. Але для

Параметри камери спостереження

Параметри	Значення
Дата прольоту боліда	9 серпня 2020 р.
Час <i>UT</i> прольоту боліда	0 ^h 14 ^m 05 ^s
Довгота місця камери λ , град.	30.370800
Широта місця камери ϕ , град.	50.380699
Висота h_0 камери над рівнем моря, м	200
Азимут A (геодезичний) оптичного центра, град.	180.426880
Висота оптичного центру над горизонтом H , град.	30.205572
Орієнтація камери відносно горизонту β , град.	~0.3
Об'єктив	Pentax 3-8
Світлосила	1:1
Матриця	VE-6047EF (1/3")
Розмір матриці (Н × В), пкл	720 × 576
Тип розгортки	прогресивна
Frame gate, повних кадрів за секунду	25

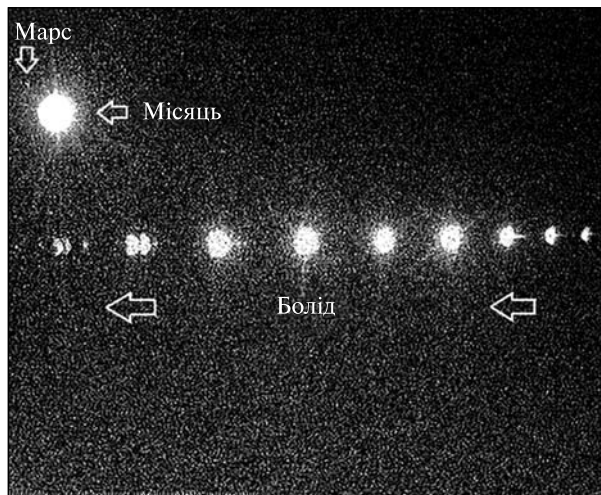


Рис. 1. Комбінований кадр з зображенням боліда, що пролетів над Києвом (відео знято у м. Вишневе) 09.08.2020 р., та зображення Марса і Місяця зліва вгорі кадру

впевненої ідентифікації потрібно було виконати хоча б мінімальну обробку спостережних даних. У кадрі був яскравий, майже повний Місяць (-10.95^m), Марс (-1.26^m) поряд з ним (рис. 1), та зображення 5-6 «зірок», які при подальшій обробці виявилися дефектами матриці.

Як уже згадувалося, даний болід пролетів через поле зору камери за час трохи більше 12 с (дещо більше 300 кадрів з розгорткою типу PAL/SECAM 25 кадрів/с), причому влетів він у кадр уже будучи достатньо яскравим — тобто загальний час життя був ще більшим.

Для демонстрації повної картини на рис. 1 було проведено комбінування окремих кадрів за таким алгоритмом. Від кожного кадру у загальній послідовності віднімався деякий кадр без динамічних об'єктів у ньому — це міг би бути і одиночний початковий кадр, однак ми використали усереднений по $N = 30$ початкових кадрах (де болід ще був відсутній) для зменшення рівня флуктуацій фону:

$$\bar{I}(x_i, y_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(x_i, y_i).$$

Далі усереднений кадр віднімався від деяких M вибраних кадрів з послідовності де був наявний болід (в нашому випадку був вибраний кожен

30-й, $M = 30$, хоча можна було б вибрати і кожен — однак через малу кутову швидкість боліда його зміщення за кадр було дуже малим), які потім сумувалися. Середнє значення фону в такому сумарному кадрі має бути рівним нулеві — лише флуктуації фону мають збільшитися у \sqrt{M} разів. Для комбінованого порівняння динамічного зображення боліда та стаціонарних зображень Місяця та Марса отриманий кадр остаточно додавався до початкового усередненого. Загальна формула такої процедури має вигляд

$$I(x_i, y_i) = \sum_{l=1}^M \{I_l(x_i, y_i) - \bar{I}(x_i, y_i)\} + \bar{I}(x_i, y_i), \quad (1)$$

або остаточно

$$I(x_i, y_i) = \sum_{l=1}^M I_l(x_i, y_i) - (M-1)\bar{I}(x_i, y_i).$$

Застосування такої формули (рис. 1) дозволяє не лише бачити всі особливості боліда в одному кадрі, а в принципі і дозволяє фотометрично порівнювати зоряні величини Місяця та боліда, оскільки вони приведені до тієї ж спільної експозиції 0.04 с (зображення боліда з різних кадрів при цьому, очевидно, не повинні накладатися одне на інше).

Унікальність такого яскравого та повільного об'єкта примусила замислитись над можливістю пошуку методів для проведення більш-менш достовірної астрометричної обробки. Найпростіший підхід — використання приблизних значень напрямку оптичної осі та знання повороту площини детектора камери (вважалося, що камера була розміщена горизонтально), а також приблизно відомого масштабу кадру — не витримує критики, оскільки точність цих параметрів є невизначеною, та загалом, як правило, залишає бажати кращого.

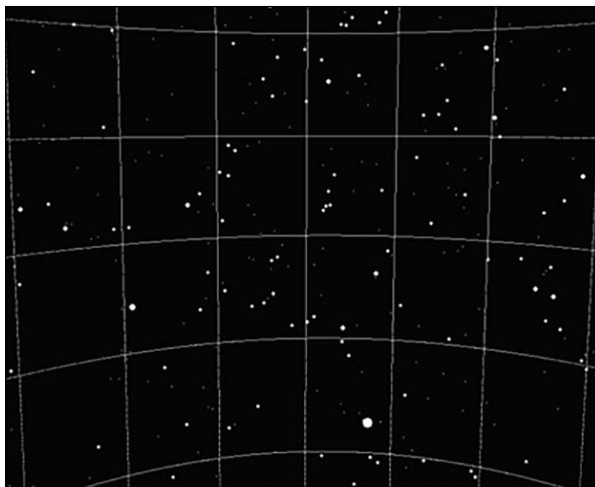
Для попереднього опрацювання зображень у кадрах було використано програмне забезпечен-

ня комплексної обробки базисних телевізійних (відео) спостережень метеорів Falling Star [8], розроблене в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Дане програмне забезпечення використовує власні розроблені методи астрометричної, кінематичної та фотометричної обробки метеорних спостережень [6, 7, 9, 11, 12, 14]. При стандартній обробці метеорних зображень у відеопослідовностях оригінальні одиночні кадри (рис. 2, *a*) не використовувалися, натомість застосовувався розділений підхід для вимірювань зображення метеора та опорних зірок. Положення метеора вимірювалися в кадрах з віднятим фоном, за алгоритмом схожим до (1), однак без додавання в кінці усередненого кадру. У такому алгоритмі усі стаціонарні об'єкти відсутні, і вимірювання зображення метеора, як астрометричні, так і фотометричні, відбуваються над плоским нульовим фоном (як правило, щоб не втрачати від'ємні флуктуації, перед збереженням у файл до інтенсивності в кожній точці додається певна константа). Вимірювання ж зображень зірок проводяться по усередненому кадрі (рис. 2, *b*), причому для зменшення флуктуацій фону можна взяти більш ніж 30 кадрів для усереднення незалежно від наявності самого метеора — його зображення після усереднення по великій кількості кадрів, як правило, повністю зникає. Тим не менше, верхня границя кількості кадрів для усереднення лімітована кутовим розміром пікселя — зображення зірок не повинні зміщуватися через добове обертання неба. На рис. 2, *в* для порівняння приведено профілі інтенсивності вздовж телевізійної строки кадру, що проходить через зображення Місяця — відповідні стандартні відхилення рівня флуктуацій фону неба також приведені на рис. 2, *в*. Для подальшого пошуку та ототожнення опорних зірок у кадрі

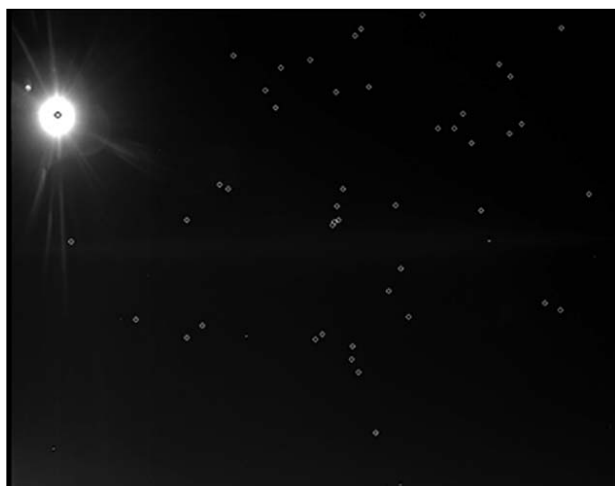
Рис. 2. Оригінальний та математично опрацьований кадр прольоту боліда: *a* — оригінальний одиночний кадр з зображенням боліда та зіркоподібних артефактів; *b* — усереднений кадр по 363 послідовних кадрах та остаточно ототожені опорні зорі; *в* — поздовжні профілі інтенсивності вздовж телевізійної строки для одиночного та усередненого кадрів; *г* — відповідна інтерактивна карта зоряного неба побудована з застосуванням редукційної моделі повного квадратичного полінома для врахування дисторсії; *д* — комбінований знімок накладених вибраних рівнів інтенсивності в просумованому кадрі; *е* — вибрані рівні («шари») інтенсивності у просумованому кадрі (за 363 кадрами), які використовувалися для початкового пошуку зірок в кадрі



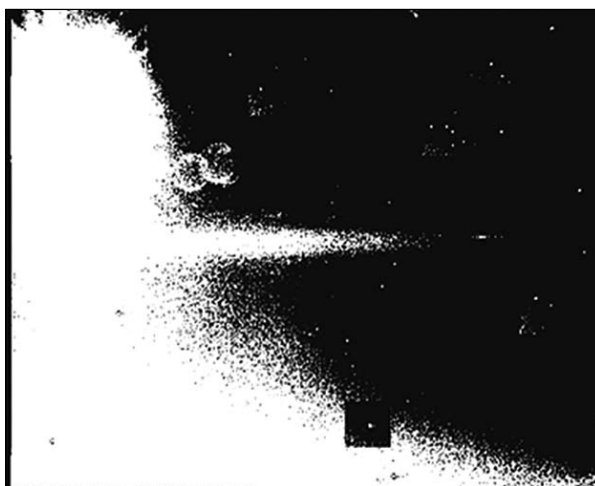
a



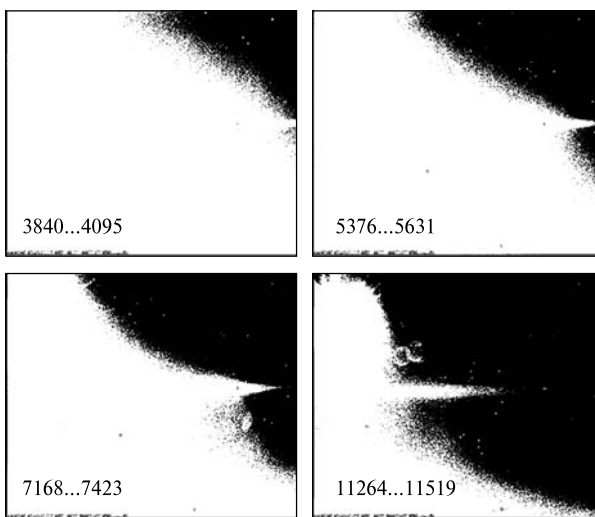
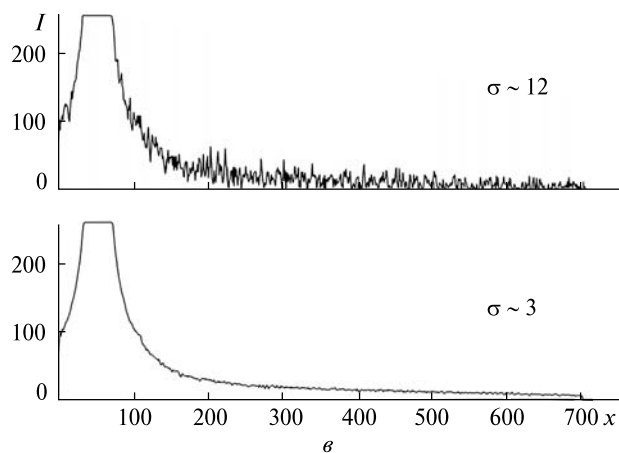
z



б



д



e

використовувалася процедура, аналогічна обробці кадрів, отриманих камерами суперізокон в обсерваторії університету, детально описана в роботах [6, 8, 14]. Поряд з оригінальним кадром будувалася штучний кадр-карта зоряного неба (за каталожними даними), причому початково — як ідеальна проєкція небесної сфери на площину за приблизно відомими координатами оптичного центра, фокусної відстані, кута повороту камери навколо оптичної осі. Далі запускала процедура автоматичного (або напівавтоматичного) ототожнення віднайдених програмно (або вибраних візуально) зображень зірок у реальному кадрі, та відповідних даних з побудованого штучного кадру за їхніми вимірними координатами x_i , y_i .

Однак через дисторсії оптико-електронного тракту телевізійної системи розбіжності у вимірних координатах були значними, і автоматична обробка ідеальної проєкції карти часто давала грубі похибки. Тому для уточнення вимірів був запропонований прийом використання зворотних редуційних моделей з тих, що використовуються при астрометричній обробці, але де шуканими величинами тепер є вимірні координати зірок x_i , y_i (та при необхідності — точки сітки карти), а регресорами виступають ідеальні координати ξ_i , η_i зірок, розраховані за каталожними даними та заданими екваторіальними координатами оптичного центра кадру. В залежності від якості зоряного неба (кількості зірок у кадрі) в редуційній моделі використовувалися лінійний, обмежений та повний квадратичні поліноми, або проєкційний метод Дейча. Рідше використовувалася обмежений кубічний поліном [6].

Така процедура усереднення кадрів, описана в роботі [14], добре зарекомендувала себе при обробці знімків, отриманих високочутливою телевізійною камерою суперізокон [1, 9—11, 13, 15, 16, 22], — кількість зірок, придатних для ототожнення та вимірювань, різко збільшувалася через зменшення рівня флуктуацій фону в \sqrt{N} , де N — кількість кадрів для усереднення. В даному випадку через малу чутливість камери, сильну місячну засвітку та наявність інтенсивних зіркоподібних артефактів таке усереднення на етапі початкового ототожнення кадру і карти

зоряного неба не дозволило однозначно ідентифікувати потенційні опорні зорі в кадрі. Одним з варіантів, що розглядався для можливого подальшого зменшення флуктуацій фону та підняття відносної інтенсивності зображень зірок було застосування цифрових фільтрів до усередненого кадру. Однак через великий градієнт від місячної засвітки з невідомим функціональним розподілом інтенсивності по кадру (рис. 2, *в*) такий варіант було відкинуто.

Для вирішення проблеми початкової ідентифікації зоряного неба було використано реалізований у програмі Falling Star [8] алгоритм сумування ряду кадрів без подальшого усереднення. Використання кадрів такого формату при звичайному виведенні сигналу на екран, яке передбачає нормалізацію всього діапазону інтенсивності до VGA-стандарту 0..255 (1 байт на піксель), буде не чим іншим, як еквівалентом розглянутому вище усередненню кадру, а відтак в даному випадку не принесе користі. Тим не менш, програма Falling Star дозволяє відтворити на екрані інтенсивності в сумарному кадрі в діапазоні 0..255 пошарово, де кількість «шарів» (або рівнів) рівна кількості просумованих кадрів, і, крім того, дозволяє змінювати початкову інтенсивність «шару» з точністю до однієї градації. Наприклад, для файлу отриманого сумуванням десяти кадрів діапазону 0..255 мінімальне значення інтенсивності теоретично дорівнює 0, а максимальне становитиме 2550. При виведенні на екран, наприклад, третього «шару» діапазону 512..767 усі значення нижче 512 будуть абсолютно чорні, вище 767 — абсолютно білі, усі між ними — сірі градації. Такий підхід є еквівалентним зміні яскравості та контрасту при лінійній передачі сигналу, коли передавальна пряма має нахил (контраст) 45° — діапазон візуалізації 0..255 не змінюється — та довільно рухомий коефіцієнт порогової яскравості (з точністю до однієї градації інтенсивності, хоча на практиці використовувалася крок 256 градацій). Очікувалося, що таке виведення даних на екран підніме контраст зображення навіть на градієнті сильної засвітки від Місяця, і дозволить візуально знайти та ототожнити хоча б деяку кількість опорних зірок в околі боліда.

Хочемо зауважити, що такий підхід себе повністю виправдав. Уже при виведенні першого рівня, на якому з'явилися градації сірого зображення у правій верхній частині кадру, одразу стало можливим ототожнити певну комбінацію зірок (рис. 2, е). Піднімаючи далі поріг яскравості на п'яти різних «кадрах», тобто для п'яти різних рівнів-шарів інтенсивності (на рис. 2, е приведено лише чотири) загалом вдалося ототожнити приблизно 30 опорних зірок, по яких було побудовано карту зоряного неба в рамках зворотної редуційної моделі повного квадратичного полінома (рис. 2, з). Загальний вигляд початково ототожнених зірок приведено на комбінованому кадрі (рис. 2, д). Після відповідної деформації карти було використано уже усереднений кадр (рис. 2, б) для подальшого пошуку опорних зірок. Загалом було ототожнено 45 зірок, приведених на усередненому кадрі, а також Марс і Місяць з відомими ефемеридами на момент спостереження ($\alpha_{Mars} = 1^h 24^m 30.8^s$, $\delta_{Mars} = 4^{\circ} 34' 44.4''$; $\alpha_{Moon} = 1^h 11^m 57.4^s$, $\delta_{Moon} = 1^{\circ} 37' 49.4''$) також були закладені у пряму редуційну модель. Цікаво зауважити, що при повній відсутності (невидимості) зірок у початкових оригінальних кадрах даним методом було віднайдено 45 зірок, найслабші з яких мали блиск $+5.4^m \dots +5.7^m$.

РЕЗУЛЬТАТИ ОДНОСТОРОННЬОЇ ОБРОБКИ БОЛІДА ТА ЇХНІЙ АНАЛІЗ

В результаті проведеної астрометричної обробки були розраховані екваторіальні координати даного яскравого об'єкта. Для обробки використовувалися різні редуційні моделі, але була вибрана знову ж таки редуційна модель 12 постійних (повний квадратичний поліном). Коефіцієнти (постійні) редуційної моделі розраховувалися не для всього кадру, як це зазвичай відбувається при обробці телескопічних знімків, а для кожного зображення боліда по опорних зорях в деякому околі навколо об'єкта — детальну методику описано в роботі [6].

На основі ототожнених зірок був розрахований кутовий розмір пікселя по кадру (його величина визначає точність розрахунків) — вона становила від $0.085^{\circ} \pm 0.003^{\circ}$ на краю кадру до

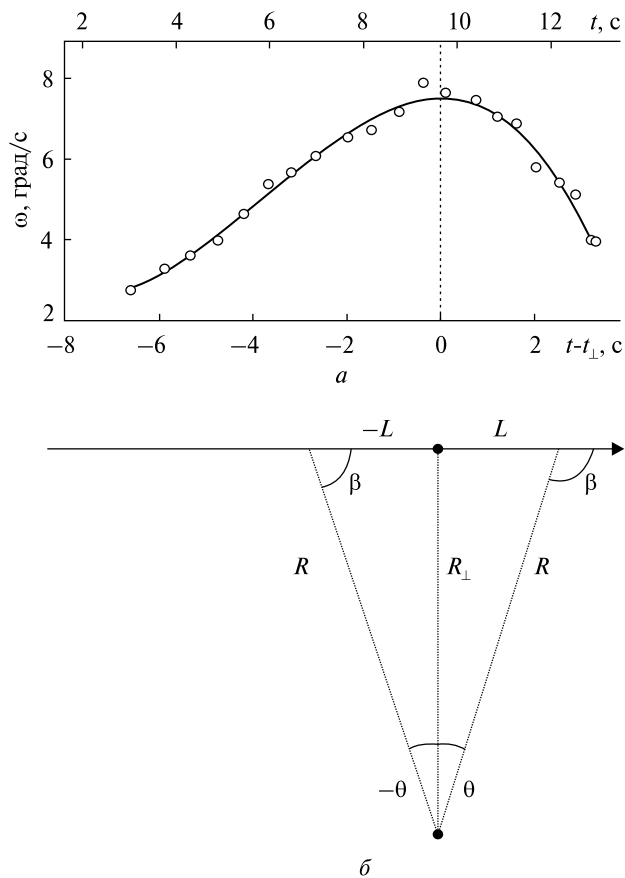


Рис. 3. Зміна кутової швидкості тіла з часом (а) та геометрична схема спостереження (б). Траєкторія метеора позначена стрілкою, точка внизу — положення спостерігача

$0.087^{\circ} \pm 0.004^{\circ}$ у його центрі. Середнє значення дорівнювало $0.086^{\circ} \pm 0.003^{\circ}$ ($\approx 5.2'$). Поле зору всього кадру при цьому становило приблизно $62^{\circ} \times 50^{\circ}$. Таким чином, кутова довжина видимої траєкторії даного світлого об'єкта дорівнювала 62° (реальна довжина була ще більшою). Початкові та кінцеві координати траєкторії були обчислені як $\alpha_{Start} \approx 322.4^{\circ}$, $\delta_{Start} \approx -9.7^{\circ}$, $\alpha_{End} \approx 22.9^{\circ}$, $\delta_{End} \approx -10.8^{\circ}$. Обчислення екваторіальних координат боліда дало можливість побудувати залежність його кутової швидкості від часу вздовж траєкторії — її приведено на рис. 3, а.

Залежність між кутовою швидкістю об'єкта та його лінійною швидкістю при довільному прямолінійному русі можна описати формулою,

приведеною в роботах [7, 14]:

$$\omega = \frac{v}{R} \sin \beta. \quad (2)$$

Як видно з рис. 3, б, при проходженні метеороїдом мінімальної відстані до спостерігача R_{\perp} формула (2) трансформується до класичного виразу $v = \omega R$ ($\sin \beta = 1$), і кутова швидкість там має максимальне значення — у нашому випадку $7.4^{\circ}/\text{с}$. Оскільки згідно з (2) кутова швидкість при постійній лінійній швидкості залежить від двох змінних параметрів $\beta(t)$ та $R(t)$, формулу (2) доцільно переписати з врахуванням $R = R_{\perp} / \sin \beta$ і отримати залежність лише від одного змінного параметра β :

$$\omega = \frac{v}{R_{\perp}} \sin^2 \beta. \quad (3)$$

Варіюючи в точці мінімальної відстані до спостерігача невідомий параметр R_{\perp} , можна було б отримати варіанти швидкості v_{\perp} , яка в цьому випадку збіглася б з початковою швидкістю тіла $v = v_0$, а вже за початковою швидкістю та іншими супутніми параметрами спробувати ідентифікувати тіло як метеороїд, або як тіло з навколоземної орбіти (для метеороїда швидкість повинна перевищувати другу космічну швидкість, тобто $v_0 > 11.2$ км/с).

Як правило, для слабких метеорів, які розвиваються до повного випаровування протягом часу, меншого від 1 с, швидкість дійсно можна вважати постійною, тобто $v = v_0 = \text{const}$, а отримане на відстані R_{\perp} значення кутової швидкості тіла $7.4^{\circ}/\text{с}$ було б зумовлене лише квадратом синуса кута β . В нашому ж випадку, коли болід спостерігався понад 12 с, очевидно, що лінійна швидкість у (3) не є постійною величиною внаслідок гальмування, тобто $v = v(t)$, або, у відповідності до рис. 3, б, $v = v(\theta)$. Оскільки $\beta = \theta + 90^{\circ}$, то для подальшого розгляду формулу (3) перепишемо у вигляді

$$\omega(\theta) = \frac{v(\theta)}{R_{\perp}} \cos^2 \theta. \quad (4)$$

З порівняння аналітичної залежності (4) та спостережних результатів на рис. 3, а видно, що залежність кутової швидкості як мінімум є несиметричною відносно точки максимально-

го зближення із спостерігачем, що, очевидно, зумовлено саме зміною швидкості руху, тобто гальмуванням космічного тіла. З даного аналізу випливає кілька важливих висновків про порівняння кутової швидкості нашого космічного тіла з гіпотетичним тілом, яке рухалась би з постійною швидкістю, що відповідає початковій швидкості нашого тіла. По-перше, їхні лінійні швидкості мали б бути однаковими та рівними v_0 при $\theta = -90^{\circ}$ (на практиці вони мали б бути рівними і при менших кутах, де гальмування ще відсутнє через розрідженість атмосфери). По-друге, кутова швидкість нашого тіла має бути меншою від кутової швидкості при $v = v_0 = \text{const}$ на всій довжині траєкторії, а відношення $v/v_0 \leq 1$ має бути монотонною функцією. По-третє, значення кутових швидкостей в найближчій до спостерігача точці для них мають бути різними, причому очевидно, що $\omega_{\perp}(v) \leq \omega_{\perp}(v_0)$. Зважаючи на перераховані фактори, можна спробувати підібрати значення кутової швидкості в точці мінімальної відстані до спостерігача для космічного тіла з невідомою швидкістю v_0 , яка при, строго кажучи, невідомій функції гальмування змогла б відтворити спостережну криву кутової швидкості у відповідності до (4). Серйозною проблемою тут є необхідність екстраполяції спостережної кривої кутової швидкості до $\theta = -90^{\circ}$ при фактичній видимості до $\theta = -38.3^{\circ}$. Найменшим значенням, яке приблизно відповідає шуканій функції, виявилось $\omega_{\perp} \approx 11^{\circ}/\text{с}$ (або більше). Тим не менш, навіть таке значення означає, що $\omega_{\perp}(v_{\perp}) / \omega_{\perp}(v_0) = v_{\perp} / v_0 = 7.4 / 11.0 \approx 0.68$ — тобто тіло втратило 32 % швидкості до точки максимального зближення, що є досить суттєвим.

Очевидно, однозначно стверджувати про таке значення гальмування на основі даних оцінок важко (в основному через суттєву екстраполяцію спостережної функції кутової швидкості), однак ми спробуємо оцінити початкову швидкість тіла параметрично від R_{\perp} , а також висоту та дальність до проекції на горизонтальну площину даної точки траєкторії. На рис. 4 приведено залежність для $v_{\perp}(R_{\perp})$, де швидкість відкладено на шкалі зліва.

Використовуючи той факт, що оптичний центр камери був розміщений на кутовій висоті близь-

ко 30.2° над горизонтом, були обчислені елевaції боліда вздовж траєкторії — вони варіювали у межах $31.8^\circ \dots 30.6^\circ$. Ці значення надали змогу обчислити відповідні до R_\perp висоти D_V та горизонтальні дальності D_H . Відповідні криві приведено на рис. 4 (шкала справа). У відповідності до наших розрахунків критичному значенню $v_0 = 11.2$ км/с відповідає значення $v_\perp = 7.7$ км/с в точці мінімальної відстані до спостерігача. Даному значенню швидкості відповідає $R_\perp \approx 60$ км, та значення висоти $D_V \approx 31$ км і горизонтальної дальності $D_H \approx 51$ км.

Всі вищі значення швидкості будуть означати, що це болід — йому відповідають більші значення дальності. Менші значення швидкості будуть означати, що спостерігались уламки космічного корабля або космічного сміття — висота польоту при цьому була значно меншою. Оскільки значення кутової швидкості в точці мінімальної відстані було оцінено наближено, зону $v_\perp = 7.7 \dots 11.2$ км/с виділено сірим кольором — ідентифікація тіла в ній є невизначеною. На жаль, проведені вище розрахунки не дали змоги однозначно ідентифікувати тіло — з достатньою імовірністю це міг бути і болід, і супутник — адже отримані значення швидкостей і висот польоту для обох випадків є адекватними.

Тим не менш, наявність в кадрі точки максимального зближення, яку ми відшукали по максимуму кутової швидкості у відповідності до (3) або (4), є досить рідкісною, і дуже корисною обставиною. У більшості випадків при спостереженнях слабких коротких метеорів на великих висотах частинки випаровуються за десятки, а то і сотню кілометрів від їхнього потенційного максимального зближення із спостерігачем. Однак у програмі Falling Star [8] дана точка априорно розглядалася як нуль-пункт шкали вздовж траєкторії L метеора для фізичної визначеності. Тоді усі точки положення метеора, які мають від'ємні значення L , автоматично лежать до точки максимального зближення із пунктом спостереження (рис. 3, б). Значення $R_\perp = 0$ означає, що метеор був стаціонарний, і теоретично був націлений у спостерігача. Умова перпендикулярності даного напрямку від спостерігача до траєкторії метеора дає можливість за односторонніми спо-

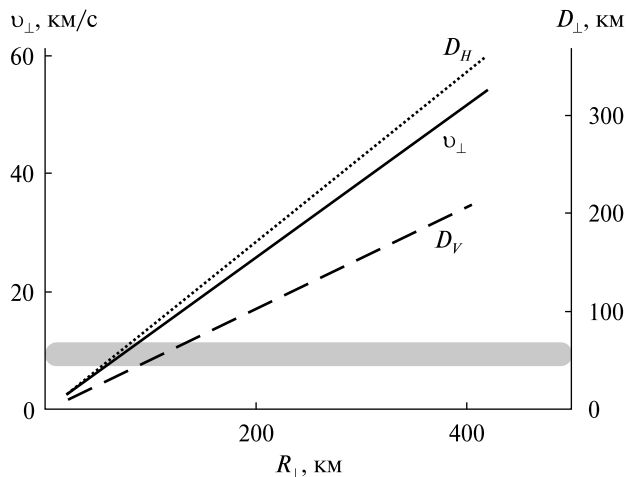


Рис. 4. Залежність лінійної швидкості в точці траєкторії, що відповідає максимальному зближенню космічного тіла із спостерігачем від параметрично заданої відстані до згаданої точки — суцільна пряма, ліва вісь ординат; та висота і горизонтальна дальність до даної точки — пунктирна та точкова прямі відповідно, права вісь ординат

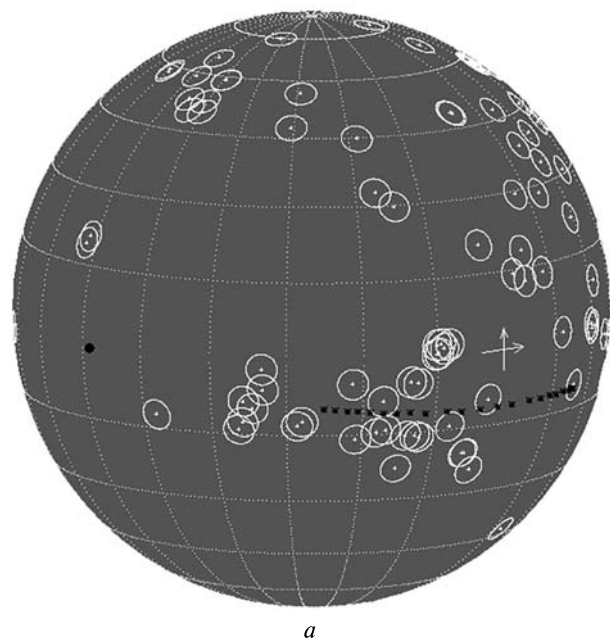
стереженнями знайти радіант метеора. Дійсно, якщо одиничний вектор нормалі до площини, який проходить через траєкторію метеора і точку спостереження, — полюс великого круга — знайти у першому наближенні (загалом це робиться методом найменших квадратів по всіх точках траєкторії метеора) як

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_{Start} \times \mathbf{r}_{End}}{|\mathbf{r}_{Start} \times \mathbf{r}_{End}|},$$

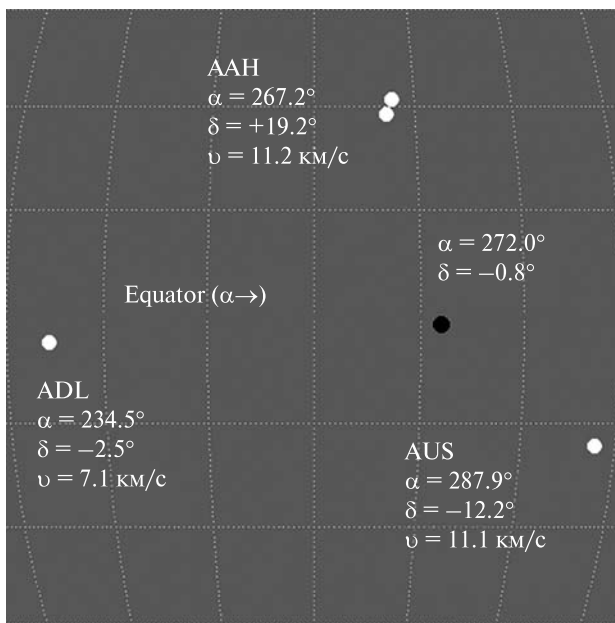
де індекси «Start» та «End» означають першу та останню точки на траєкторії метеора з обчисленими екваторіальними координатами, то одиничний вектор напряму на радіант метеора знайдеться як

$$\mathbf{r}_{RAD} = \frac{\mathbf{r}_\perp \times \mathbf{n}}{|\mathbf{r}_\perp \times \mathbf{n}|}.$$

За допомогою відповідних розрахунків було знайдено, що $\alpha_{RAD} \approx 272.0^\circ$, $\delta_{RAD} \approx -0.8^\circ$. На рис. 5 приведено зображення небесної сфери (вид ззовні), на якій зображено точки вздовж траєкторії метеора з обчисленими екваторіальними координатами — на рисунку метеор рухався у бік збільшення прямого сходження, тобто для зовнішнього огляду зліва направо. Також приведе-



a



b

Рис. 5. (a) Небесна сфера — вигляд ззовні. Осі початку координат — точка весняного рівнодення — показують напрям зростання прямого сходження та схилення. Крок сітки по обох координатах складає 15° . (б) Обчислений радіант та найближчі радіанти метеорних потоків: швидкість — геоцентрична, крок сітки — 10°

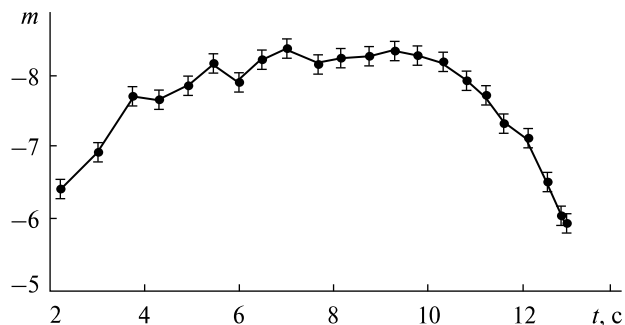


Рис. 6. Крива блиску — заатмосферна зоряна величина космічного об'єкта як функція часу (межі похибок відповідають 2-м стандартним відхиленням)

но обчислене зображення видимого радіанта, та радіанти усіх метеорних потоків (світлі точки) за 1...20 серпня (включаючи також ще не остаточно встановлені потоки, тобто робочий список радіантів) за даними Метеорного Центру Даних Міжнародного Астрономічного Союзу (MDC IAU) [2—5, 18].

Ще один з фізичних параметрів, який можна визначити (але який теж не допоможе ідентифікувати тіло) — крива блиску космічного тіла як функція часу. Реалізувати дану процедуру для такого яскравого об'єкта очевидно дозволяє наявність зображення Місяця в кадрі, та ще й на дуже близькій висоті над горизонтом, що дозволяє проводити пряме порівняння блиску об'єкта з заатмосферною зоряною величиною Місяця, тобто без корекції за атмосферне поглинання, яке є приблизно однаковим для обох об'єктів.

Визначити ж достовірно похибку вимірів зоряної величини об'єкта досить важко, адже об'єкт змінює свій блиск від кадру до кадру. Загалом похибка внутрішніх фотометричних вимірів — інтегральна сума інтенсивностей V в усіх пікселях, які належать зображенню об'єкта над фоном неба — складається з двох складових: розкиду флуктуацій фону, за якими визначається його середнє значення (постійна величина), яке потім віднімається від вимірів об'єкта; та флуктуацій інтегрального значення V за рахунок атмосферної турбуленції, яке має бути пропорційне самій величині V , тобто $\sigma_V \propto V$. Якщо знехтувати першою складовою, і вважати що $\sigma_V / V = \text{const}$, то дану відносну похибку

можна знайти за вимірами зображень Місяця в різних кадрах, зважаючи на те, що його блиск є постійним. Для Місяця при заатмосферній зоряній величині $m = -10.95$, $\sigma_V / V \approx 0.042$, тобто відносна похибка вимірів дорівнює 4.3 %. Отже, зоряна величина світного об'єкта знайдеться як $m = m_M - 2.5 \lg(V / V_M)$, де індекс 'М' означає Місяць. Тоді похибка обчислюється з виразу

$$\sigma_m \approx \sqrt{2} \frac{2.5}{\ln 10} \frac{\sigma_V}{V}.$$

Криву блиску об'єкта як функцію часу приведено на рис. 6.

ВИСНОВКИ

Головний результат даної роботи полягає в демонстрації можливості отримання максимуму досяжної інформації про космічне тіло, що влітає в земну атмосферу, навіть при односторонніх спостереженнях, проведених у максимально несприятливих умовах, як зовнішніх, так і внутрішніх. В даному випадку несприятливі внутрішні умови були пов'язані з низькою чутливістю камери, а зовнішні — з сильною засвіткою від яскравого Місяця, який був майже у повні (з іншого боку, наявність зображення Місяця у кадрах відеозапису дозволила провести фотометрію даного яскравого світного об'єкта). Застосування відносно простих алгоритмів сумування і усереднення відеокадрів в цілому та їхнє інтенсивно-порівняне виведення на екран дозволило віднайти та ототожнити в кадрах 45 опорних зірок, найслабші з яких мали блиск $5.4^m \dots 5.7^m$ при повній невидимості зображень зірок в початкових одиночних кадрах відеопослідовності.

Дослідження форми обчисленої кривої кутової швидкості метеора та наявність у полі зору точки максимального зближення об'єкта із спостерігачем дозволила оцінити гальмування космічного тіла в атмосфері, причому втрата швидкості тіла від початку до точки максимального зближення могла становити 32 %. Дані обчислення та моделювання не дали змоги відповісти на питання належності космічного тіла до

метеороїдів (швидкість мала бути більшою від 11.2 км/с) чи до космічного сміття, включаючи уламки орбітальних супутників — отримані результати допускають обидва варіанти. Наявність у полі зору точки максимального зближення із спостерігачем дозволяє також обчислити за односторонніми спостереженнями радіант можливого метеороїда, що і було зроблено. Однак зона околу даного радіанта на небесній сфері є по суті порожньою, а три відносно наближені радіанти метеорних потоків (кутова відстань понад 15°) мали надзвичайно малі геоцентричні швидкості (7...12 км/с), тобто ці метеорні потоки наздоганяють Землю. З іншого боку, площина руху траєкторії об'єкта лежить майже паралельно (хоча і не зовсім) та близько до площини екватора, та тіло рухалося в напрямку обертання Землі, що може свідчити про можливе падіння геостационарного супутника. Останнє припущення є, правда, малоймовірним, зважаючи на те, що геостационарні супутники, як правило, не скидаються в атмосферу, а виводяться на вищі орбіти поховання. Побудована фотометрична крива блиску об'єкта за допомогою калібрування, проведеного за зображенням Місяця (зоряна величина варіювала у межах $-5.5^m \dots -8.5^m$) також не дозволила провести ідентифікацію тіла. І хоча інформація, отримана в результаті опрацювання одностороннього відеозапису даного космічного тіла, не дозволяє отримати усі кінематичні характеристики об'єкта, такі як модуль його геоцентричної швидкості та відповідно елементи орбіти, наведена методика опрацювання відеозапису, отриманого в таких складних спостережних умовах, буде безперечно корисною тим, хто займається метеорними спостереженнями та обробкою спостережних даних.

Робота виконана за часткової підтримки державної бюджетної теми 19БФ023-02 МОН України.

Автори вдячні членам Київського астрономічного клубу «Астрополіс» за їхній вклад в розвиток спостережної метеорної астрономії.

REFERENCES

1. Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranucha Ju. G., Rozhilo A. A., Eryomin S. S., Kozak P. N. (1995). Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev. *Earth, Moon and Planets*, **68**, 297—301.
2. Jenniskens P., Jopek T. J., Janches D., Hajdukova M., Kokhirova G. I., Rudawska R. (2020). On removing showers from the IAU Working List of Meteor Showers. *Planet. and Space Sci.*, **182**, id. 1048212020.
3. Jopek T. J., Jenniskens P. M. (2011). *The Working Group on Meteor Showers Nomenclature: A History, Current Status and a Call for Contributions*. Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies. The Meteoroids 2010. Proceedings of the Conference (Breckenridge, Colorado, USA, May 24—28, 2010). Eds W. J. Cooke, D. E. Moser, B. F. Hardin, D. Janches. NASA/CP-2011-216469, 7—13.
4. Jopek T. J., Kanuchova Z. (2014). *Current status of the IAU MDC Meteor Showers Database*. The Meteoroids 2013. Proceedings of the Astronomical Conference at A. M. University (Poznan, Poland, Aug. 26—30, 2013). Eds. T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. Univ. Press, 353—364.
5. Jopek T. J., Kanuchova Z. (2017). IAU Meteor Data Center—the shower database: A status report. *Planetary and Space Sci.*, **143**, 3—6.
6. Kozak P. M. (2002). Analysis of the methods and precision of determination of the equatorial coordinates in digital reducing of TV observations of meteors. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **18**, No. 5, 471—480.
7. Kozak P. M. (2003). A vector method for the determination of trajectory parameters and heliocentric orbit elements of a meteor in TV observations. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **19**, No. 1, 62—76.
8. Kozak P. (2008). “Falling Star”: Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations. *Earth, Moon, and Planets*, **102**, No. 1-4, 277—283.
9. Kozak P. M. (2014). *Semi-empirical method for the photometry of low-light meteors from observations with the isocon television system*. The Meteoroids 2013. Proceedings of Astronomical Conference at A. M. University, Poznan, Poland, Aug. 26—30. Eds. T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. Univ. Press, 335—343.
10. Kozak P. M. (2019). Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classical heights. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **35**, No. 6, 286—294.
11. Kozak P. M., Kozak L. V. (2015). Method for photometry of faint meteors and artificial earth’s satellites from observations with super-isocon TV systems. *Space Sci. and Technol.*, **21**, No. 1, 38—47 [in Ukrainian].
12. Kozak P. M., Lapchuk V. P., Kozak L. V., Ivchenko V. M. (2018). Optimization of video camera disposition for the maximum calculation precision of coordinates of natural and artificial atmospheric objects in stereo observations. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **34**, No. 6, 314—327.
13. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha A. (2007). Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv. *Adv in Space Res.*, **39**, No. 4, 619—623.
14. Kozak P. M., Rozhilo A. A., Taranukha Y. G. (2001). *Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors*. The Meteoroids 2001. Proceedings of Conference (Kiruna, Sweden, 6—10 August, 2001). ESA-SP 495. Ed. B. Warmbein, 337—342.
15. Kozak P. M., Rozhilo O. O., Taranukha Y. G., Kruchynenko V. G. (2011). Kinematic characteristics of September meteors from double-station TV observations in 2003. *Space Sci. and Technol.*, **17**, No 4, 51—62 [in Ukrainian].
16. Kozak P. M., Watanabe J. (2017). Upward-moving low-light meteor. I. Observation results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **467**, No. 1, 793—801.
17. Kozak P. M., Watanabe J. (2020). Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **497**, No. 4, 5550—5559.
18. *Meteor Data Center of International Astronomical Union*. URL: <https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/> (Last accessed 18 April 2021).
19. *MeteorNews, EDMOND database*. URL: <https://www.meteornews.net/edmond/edmond/edmond-database/> (Last accessed 18 April 2021).
20. *SonotaCo.com UFO Capture*. URL: https://sonotaco.com/e_index.html (Last accessed 18 April 2021).
21. *SonotaCo Network Japan Database*. URL: <http://sonotaco.jp/doc/SNM/index.html> (Last accessed 18 April 2021).
22. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=55RYaanYrPU> (Last accessed 18 April 2021).

Стаття надійшла до редакції 18.04.2021
 Після доопрацювання 28.08.2021
 Прийнято до друку 11.10.2021

Received 18.04.2021
 Revised 28.08.2021
 Accepted 11.10.2021

*P. M. Kozak*¹, Senior Researcher, Ph.D. (Phys. & Math.)

E-mail: kpm@knu.ua

*Y. E. Zlochevskiy*², observer

*L. V. Kozak*³, Associate Professor, Ph.D. (Phys. & Math.)

*S. V. Stariy*⁴, Senior Researcher, Ph.D. (Phys. & Math.)

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomical Observatory

3 Observatorna Str., Kyiv, 04053 Ukraine

²Kyiv Astronomical Club “Astropolis”

Kyiv, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, Physical Faculty

Kyiv, Ukraine

⁴V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine

Kyiv, Ukraine

PROBLEMS OF PROCESSING VIDEO RECORDS OF BRIGHT BOLIDES AND FALLING SPACECRAFT REMNANTS DETECTED BY LOW-SENSITIVE HOUSEHOLD VIDEO CAMERAS IN POOR OBSERVATIONAL CONDITIONS

We present the method for kinematic and photometric processing of results of single-station video observations of a unique bright fireball (bolide or space vehicle remnant) carried out in bad observational conditions. Due to the low sensitivity of the video camera, lots of star-shaped artifacts in the camera detector on the one hand, and the bright Moon of -10.95 mag, which was directly in the camera field of view on the other, the star images were completely absent in all the frames. It is demonstrated that using the averaging and summing algorithms applied to the whole set of frames and the display of different dynamic layers of intensity allowed us to find and identify 45 reference stars, the faintest of which were of $5.4...5.7$ mag. Due to the visibility of the point of closest approach of the object trajectory to an observer, which corresponds to the maximum angular velocity, in the camera field of view and the performed modeling, we obtained the next data about the fireball from the single-station detection after the video processing. The fireball fall lasted longer than 12 seconds, the angular length of the trajectory exceeded 60 deg, maximum angular velocity was computed as 7.4 deg/s. It was shown that the space body in the point of maximal approach could lose near 32 percent of its initial velocity. Visibility of the maximal approach point allowed us to calculate the right ascension and declination of the visible radiant as 272.0 and -0.8 deg, respectively. The luminosity of the fireball was varying in the range of -5.5 to -8.5 mag. All the calculations performed did not allow us to unambiguously identify the fireball as a meteoroid or as a cosmic debris fragment.

Keywords: meteor, meteor shower, bolide, space debris, meteor trajectory parameters, photometry.