

УДК 523.68, 520.82

П. М. Козак¹, Л. В. Козак²

¹ Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

МЕТОД ФОТОМЕТРІЇ СЛАБКИХ МЕТЕОРІВ ТА ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ІЗ СПОСТЕРЕЖЕНЬ З ТЕЛЕВІЗІЙНИМИ СИСТЕМАМИ СУПЕРІЗОКОН

Пропонується універсальний напівемпіричний метод фотометрії слабких метеорів та штучних супутників Землі. Метод розроблявся для фотометричних вимірювань і редукацій зображень, отриманих телевізійними спостережними системами типу суперізокон, відомих своєю нелінійністю відгуку на вхідний сигнал, та післясвітінням динамічних зображень у телевізійному кадрі. Напівемпіричний підхід проявився у тому, що фотометричні залежності телевізійної системи для рухомих та стаціонарних точкових об'єктів досліджувалися шляхом фотографування зоряного неба камерою, яка оберталася з різними кутовими швидкостями, включаючи нульову. На основі отриманих результатів побудовано калібрувальну криву та розраховано криву блиску для слабого метеора 4–7^m. Запропонована методика універсальна, і її можна використати для фотометричної обробки точкових рухомих світних об'єктів, отриманих будь-якою теле- чи відеосистемою.

Ключові слова: метеори, телевізійні спостереження метеорів, фотометрія метеорів.

ВСТУП

Фотометрія метеорів за результатами фотографічних спостережень була розроблена в середині 20-го сторіччя. Найбільш детально метод фотометричних редукацій для фотографічних метеорів, отриманих за допомогою нерухомих камер, був описаний в роботах [1] та [5]. В основу фотометричних вимірювань було покладено той факт, що зображення метеора на фотоплівці (чи штучного супутника Землі) та зір мали однакову форму. Зображення метеорів (супутників) витягувалось у лінію через свій власний рух, а зірок — через добове обертання неба (експозиція 30–60 хв). Таким чином, фотометричні вимірювання за допомогою мікроденситометра відбувалися ідентично. За вимірюваннями зоряних зо-

бражень будувалася калібрувальна крива, і далі, за вимірюваннями з тими ж характеристиками мікроденситометра, визначалася деяка ефективна зоряна величина метеора. Ефективна зоряна величина метеора відрізнялася від реальної, оскільки вона була отримана за зоряними зображеннями, час експозиції яких відрізнявся від метеорних, причому на декілька порядків. Для корекції ефективної зоряної величини метеора до реальної було запропоновано формулу [5], яка пов'язувала зоряні величини зір і метеора через швидкості руху їхніх зображень по фотографічній плівці. Аналогічна процедура була використана в редукаціях спостережень з Прерійної Метеорної Мережі [17].

У подальших роботах [1] у формулу був добавлений коефіцієнт Шварцшильда, оскільки було досліджено, що закон взаємозаміщення не виконується через велику різницю тривалості експо-

зиції зображень метеора і зір порівняння. Коефіцієнт був різний для різних типів фотографічних плівок, що ускладнювало використання згаданої формули. Тому на практиці для фотометрії метеорів використовувалася установка «штучний метеор», яка створювала на плівці зображення точкових об'єктів, які рухалися з тими ж кутовими швидкостями, що і метеори та супутники [1, 19]. Очевидно, що результати такого експерименту можна було використовувати лише для даного типу плівки і параметрів об'єктива.

Фотометрія метеорів або супутників за телевізійними спостереженнями принципово відрізняється від фотографічної. З одного боку телевізійна розгортка дозволяє розглядати динамічний об'єкт в його розвитку, оскільки час розгортки одного кадру завжди (або майже завжди) менший від часу життя метеора, і тим більше — часу наявності супутника в кадрі, що мало б спростувати фотометричну обробку. З іншого боку, метеор залишає на кадрі пряму лінію, аналогічну до фотографічного зображення (штрих), але по довжині обмежену часом розгортки, тоді як зірки порівняння залишаються точковими об'єктами. Очевидно, що схема фотометричних вимірів має суттєво відрізнитися від фотографічної.

При фотометричних вимірюваннях метеорів та супутників, отриманих за допомогою сучасних відеокамер з ПЗЗ-приймачем та підсилювачем яскравості, найчастіше використовується метод сумування пікселів, запропонований у роботі [9], та пізніше використаний у роботах [7, 18]. В даному методі використовується той факт, що зображення метеора в кожному кадрі має форму штриха певної довжини та інтенсивності. Сумуючи інтенсивність над фоном у пікселях, що належать штриховому зображенню метеора, та порівнюючи його з сумами інтенсивностей у пікселях зображень зір, можна отримати зоряну величину метеора. Слід застерегти, що такий метод буде давати коректний результат лише при лінійному відгуку сигналу відеосистеми на вхідний світловий потік. Тому для застосування такого підходу слід проводити дослідження спостережної системи на лінійність, що можна зробити через тест по зорях з обертанням камери [11, 13, 14].

При використанні для спостережень високочутливих камер типу ортикон (суперортикон) або ізокон (суперізокон) використання такого підходу неможливе, оскільки, крім явного нелінійного відгуку електронного сигналу на оптичний, дані системи мають суттєву інерційність накопичення та зчитування сигналу з мішені електронної передавальної трубки. Не дивлячись на те, що такі системи є досить застарілими та мають ряд недоліків, їм поки що немає рівних у чутливості, тому вони досі використовуються для спостережень метеорів [8, 12, 15]. В даній роботі пропонується напівемпіричний метод фотометрії метеорів, супутників та інших точкових динамічних об'єктів, зареєстрованих з допомогою телевізійних камер суперізокон. Оскільки методика є однаковою для всіх точкових динамічних об'єктів, подальший розгляд методу буде демонструватись на прикладі обробки метеорів.

ТЕОРІЯ ФОТОМЕТРІЇ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ МЕТЕОРІВ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Освітленість, що створюється слабким метеором протягом часу t його польоту вздовж траєкторії L в атмосфері на відстані R від спостерігача, можна представити в загальному функцією $E_1(L, t)$, де E_1 (Дж·с⁻¹м⁻²м⁻¹) — енергія випромінювання за одиницю часу через одиницю площі з одиниці довжини траєкторії, (або Дж·с⁻¹м⁻²град⁻¹ — з кутової одиниці траєкторії, якщо траєкторія не може бути розрахована і R невідоме, наприклад при односторонніх спостереженнях). Очевидно, що метеор в такому випадку розглядається як одновимірно-протяжний об'єкт, в якому випромінювання у будь-який момент часу t відбувається як з метеорної коми протягом його руху, так і з його іонізованого атмосферного сліду. Для більшості слабких метеорів, що спостерігаються телевізійною системою, світіння атмосферного метеорного сліду є дуже слабким та швидко затухає, тому метеор можна розглядати як світний точковий рухомий об'єкт. В цьому випадку має місце функціональна залежність $L = L(t)$, і криву блиску метеора можна представити функцією $E_0(t)$ або $E_0(L)$, де E_0 (Дж·с⁻¹м⁻²) — освітленість. Зазвичай крива блиску метеора будується як функція висоти. У випадку дифузної або

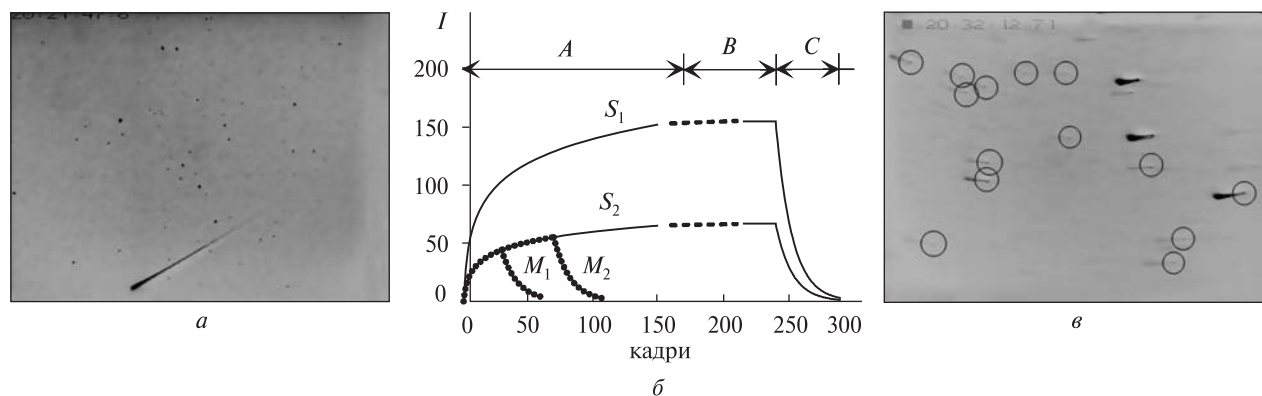


Рис. 1. Демонстрація інерційності телевізійної системи з передавальною трубкою суперізокон: *a* — залишковий електронний слід метеора в ТВ-кадрі; *б* — схематичне зображення повільного накопичення заряду та його затухання для двох гіпотетичних зір S_1, S_2 та метеорів M_1, M_2 ; *в* — залишки стаціонарного зображення зірок, коли світло в дане місце уже не падає — зміщення камери (зображення телевізійних кадрів інверсне)

хмароподібної структури метеора [6, 16, 20, 21], зареєстрованої за допомогою спостережної системи з високою роздільною здатністю, можна ввести до розгляду поверхневу освітленість (поверхневу зоряну величину) як функцію азимуту A та зенітної відстані Z_R метеора: $E_2(A, Z_R, t)$, де E_2 вимірюється в Дж·с⁻¹·м⁻²·град⁻² (аналогічна фотометрія проводиться і для інших просторово протяжних об'єктів, наприклад ком та хвостів комет, галактик тощо). Очевидно, що величини E_0, E_1 та E_2 зв'язані між собою одинарним та подвійним інтегруванням по просторових змінних.

Спостережні системи, оснащені передавальними трубками типу суперізокон, дуже інерційні в накопиченні та зчитуванні сигналу, і тому мають довге післясвічення (іноді десятки кадрів, в залежності від інтенсивності вхідного сигналу). Метеор в кадрі залишає хвіст у зображенні, який може існувати більше десяти кадрів. На рис. 1, *a* приведено телевізійне зображення метеора в десятому кадрі після його виникнення. Зміщення даного метеора від кадру до кадру складає близько однієї десятої від його видимого в кадрі зображення, причому початок зображення все ще залишається видимий і у приведеному десятому кадрі. Очевидно, що відділити справжнє атмосферне післясвічення при його наявності від електронного практично неможливо. Причин електронного післясвічення лежить у конструк-

ції самої передавальної трубки. Зчитування заряду за допомогою електронного променя є статистичним процесом, і заряд з мішені ТВ-трубки за один кадр не зчитується повністю. Це призводить до поступового зростання заряду на мішені у місцях проекції оптичних сигналів до певного часу, допоки процес не стабілізується — рис. 1, *б*, зона «*A*». Далі інтенсивність стаціонарного зображення не змінюється — зона «*B*». Якщо раптом оптичне зображення зникає, електронне зображення після цього зникає поступово — зона «*C*». У правильності таких тверджень можна переконатися, змістивши камеру вбік під час спостережень — рис. 1, *в*. Зображення зір почнуть залишати з собою електронні «хвости», а у положенні стаціонарного зображення, де вже немає джерела світла, продовжує певний час залишатися точкове зображення (найбільш помітні залишки на рис. 1 справа, виділені колами).

Очевидно, що всі описані вище причини унеможливають використання будь-якої іншої моделі метеорних вимірювань, окрім моделі метеора як рухомого точкового світлого об'єкта, а вимірюватися має величина E_0 . Оскільки телевізійна система типу суперізокон орієнтована на спостереження гранично слабких метеорів, які залишають дуже слабке і коротке атмосферне післясвічення, то таке обмеження не є критичним.

В даній роботі ми не будемо розглядати усі фотометричні редуції, такі як перехід від власної

фотометричної системи до каталожної, корекція зоряної величини за атмосферне поглинання, приведення зоряної величини до абсолютної, корекція фотометричних вимірів по полі зору та ін. З одного боку, такі редуції є класичними, з іншого — для системи суперізокон вони частково описані в роботі [11]. Сконцентруємо увагу на коректності фотометричних вимірюваних характеристик, які б не залежали від описаних вище складнощів.

ІДЕЯ НАПІВЕМПІРИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ФОТОМЕТРІЇ МЕТЕОРІВ

Як стає зрозумілим з описаного вище, провести коректну фотометричну обробку метеора, отриманого ТВ-системою типу ізокон дуже складно. Враховуючи динамічність налаштувань ТВ-системи (одна і та ж зірка може давати різний відгук в залежності від налаштування коефіцієнта підсилення та точності електромагнітного фокусування) стає очевидним, що порівнювати фотометричні виміри метеора можна лише з зорями порівняння, які наявні у тій же серії кадрів, що і метеор. Однак є дві великі проблеми: одна — вибір вимірюваного параметра для зображень зір та метеора, а інша — порівняння цих значень. Для стаціонарних зір оптимальним є виміри їхніх фотометричних об'ємів

$$V_* = \sum_{x,y \in * } I(x,y)$$

(суми інтенсивності над фоном у пікселях, що належать зображенню), та подальша побудова калібрувальної кривої як функції $\log V_* = f(m_*)$. Логарифм взятий з тих міркувань, що зоряна величина є логарифмом освітленості, а фотометричний об'єм зорі прямо пропорційний освітленості $V_* \propto E_*$, тому $\log V_* \propto m_*$, і така залежність повинна бути прямою лінією. Однак для метеорів виміряти аналогічну величину неможливо, оскільки через інерційність неможливо відділити зображення, отримане в даному кадрі, від попереднього «хвоста». Можна було б просумувати кадри з зображенням метеора, як пропонувалося в роботі [11], а потім виділити частину метеороного просумованого зображення, що відповідає за довжиною часові одного кадру. Приблизно така схема пропонувалася в роботі [10]. Однак така

схема може бути застосована для камер з лінійним відгуком на вхідний сигнал. Для камер суперізокон характерний нелінійний відгук. Як було показано в роботі [2], $V_* \propto E_*^{0.75}$, тобто функція нелінійна, звідки випливає, що один і той же об'єкт буде створювати різний інтегральний відгук за час кадру, в залежності від того, чи є він стаціонарним, чи рухається (що більша швидкість руху зображення об'єкта, то меншу інтенсивність у кадрі I він створюватиме). Насамкінець, як видно з рис. 1, β , інтенсивності зображення зір лежать у стаціонарній зоні «B», тоді як метеор через швидке зміщення функції розподілу точки (ФРТ) залишається в зоні «A», і дає суттєво менший відгук. Тому навіть якби можна було геометрично відділити та виміряти сигнал від метеора, отриманий протягом одного кадру, порівнювати його з сигналом від зір неможливо. Як показано на рис. 1, β , метеори M_1 , M_2 з різними кутовими швидкостями ($v_{M1} > v_{M2}$), але з тією ж освітленістю (зоряною величиною), що й зоря S_2 , будуть викликати менший відгук на мішені, ніж у стаціонарному стані.

Отже, слід вимірювати деякий параметр, який був би пропорційний вхідному потоку енергії від об'єкта, з одного боку, і був би однаково вимірюваний для рухомих та стаціонарних зображень. Найпростішим таким параметром [2] є інтенсивність зображення над фоном в одному пікселі з найбільшим значенням $I(x,y)$ (для стаціонарного зображення — у центрі зорі $I_0 = I(0,0)$). Однак через флуктуації виміри цього параметра будуть мало точними. Крім того, інтенсивність у максимумі зображення об'єкта найбільш чутлива до перенасичення, тобто її збільшення практично зупиняється після деякого граничного значення I_{\max} . При цифровій обробці кадрів з діапазоном інтенсивності $I \in 0 \dots 255$ (8 біт/пкл) зростання I практично зупиняється при наближенні до верхньої межі. Значно кращим видається вибір площі S поперечного фотометричного перерізу над фоном, проведеного через точку максимальної інтенсивності рухомого зображення в даному кадрі. Похибка вимірів S буде у \sqrt{N} менша, ніж для одиночних пікселів, де N — кількість сумованих пікселів, крім того, при досягненні верхньої межі I_{\max} площа продовжує зростати за рахунок

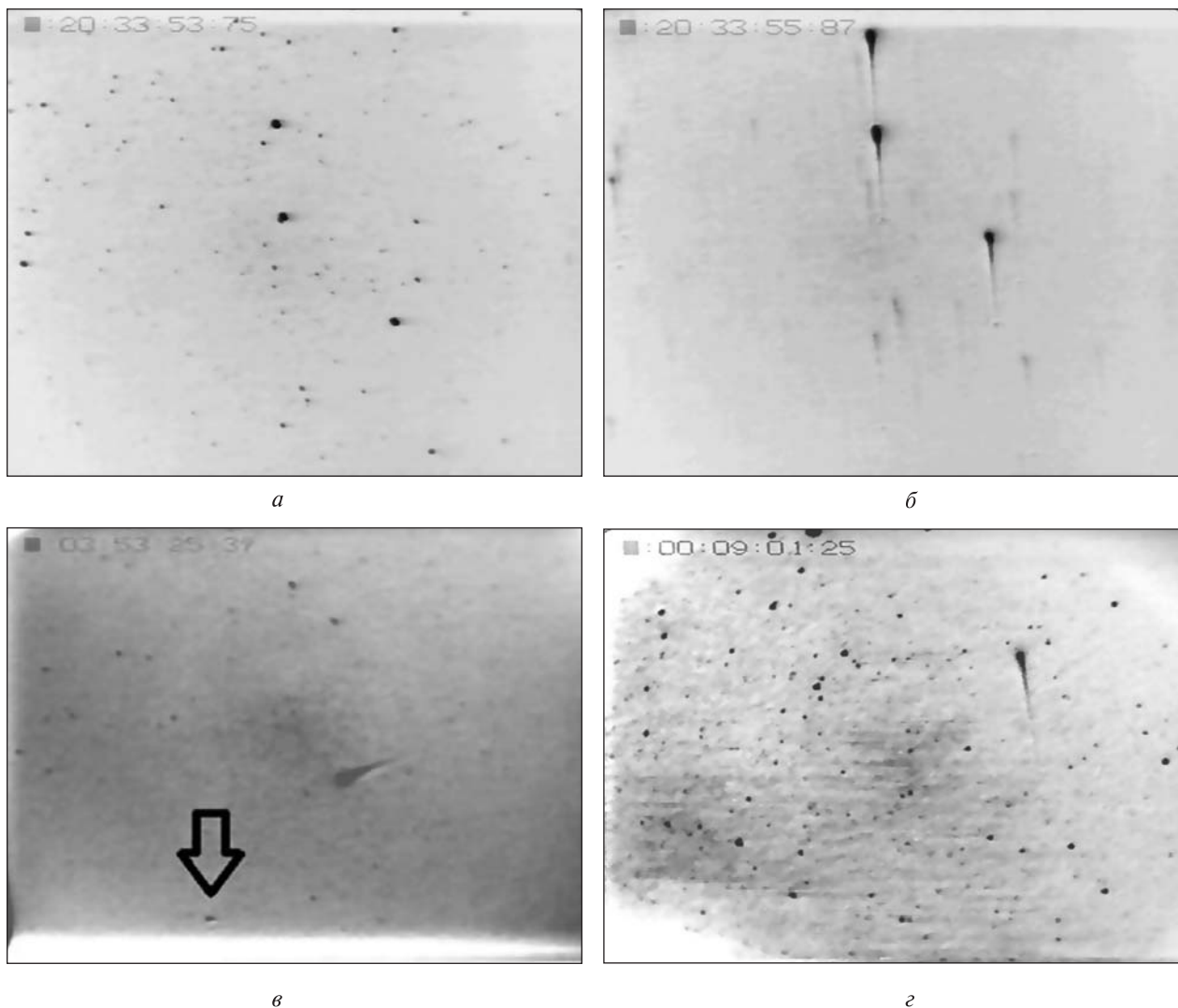


Рис. 2. Тест «штучний метеор»: *а* — стаціонарний кадр (Велика Ведмедиця), *б* — та ж область неба, отримана з рухомою камерою, *в* — кадр одночасно з метеором та штучним супутником Землі, *г* — кадр з реальним метеором

розширення поперечного розміру зображення. При такому підході калібрувальну криву можна будувати як функцію $S_* = S_*(m_*)$. Однак, вимірявши аналогічне значення для метеора S_M , заходити з ним у таку калібрувальну криву не можна через різні експозиції рухомого метеора і зір порівняння, оскільки площа фотометричного перерізу залежить, крім зоряної величини m_M , від швидкості руху зображення ФРТ по кадру: $S_M = S_M(m_M, v_M)$. Виходом з такої ситуації є «зупинка» зображення метеора, тобто визначення його фотометричного відліку $S_M(m_M, 0)$, коли

зображення було б нерухомим. Для встановлення виду функції $S_M = S_M(m_M, v_M)$ можна скористатися тестом з рухомою камерою при зйомці зоряного неба [11, 13, 14], оскільки зорі також є точковими об'єктами, відповідними до нашої моделі метеора. Підбираючи широкий діапазон інтенсивності зір та відповідний до метеорного набір швидкостей руху зображень зір по кадру (він визначається різними кутowymi швидкостями обертання камери), отримаємо деяку залежність $S_* = S_*(m_*, v_*)$, включаючи варіант $v_* = 0$.

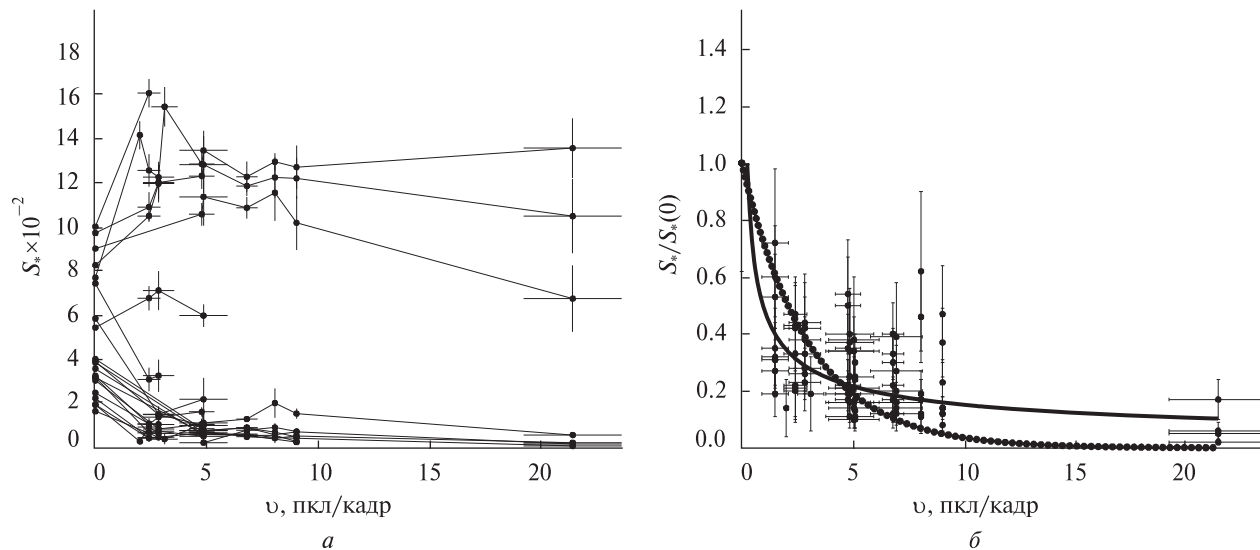


Рис. 3. Залежність площі фотометричного поперечного перерізу від швидкості руху зображення по кадру (пкл/кадр) для першої групи зір (а) та апроксимація відносної площі фотометричного перерізу для всіх неперенасичених зір з обох вибірок (б)

На рис. 2 приведено зображення стаціонарного та рухомого поля зору з зорями, та кадри з реальним метеором та штучним супутником Землі.

Для встановлення залежності площі фотометричного перерізу рухомого зображення зірки від швидкості руху зображення по кадру отримано графіки для груп зір з сузір'їв Великої Ведмедиці (перша група) та Орла (друга група). В першій групі оброблено дані для 21 зорі, набір швидкостей: 0, 2.00, 2.41, 2.84, 3.11, 4.78, 4.86, 6.81, 8.07, 9.04, 21.45 пкл/кадр, що при кутовому розмірі пікселя 4' та розгортці 25 кадрів за секунду відповідає значенням 0, 3.33, 4.02, 4.73, 5.18, 7.97, 8.10, 11.35, 13.45, 15.07, 35.75 град/с. Друга група налічувала 11 зірок та набір швидкостей 0, 1.50, 5.05, 5.10, 6.96, 28.29 пкл/кадр, або 0, 2.49, 8.42, 8.50, 11.61, 80.48 град/с. Обмежений набір значень швидкостей обумовлений складністю постановки експерименту з рухомою телевізійною камерою, яка працює 25 повних кадрів за секунду (для опрацювання використовувалися лише півполя кадру) — будь-яка мала зміна швидкості призводить до практично миттєвої зміни фотометричного профілю зображення.

Однак даний набір достатньо задовільно відображає діапазон кутових швидкостей метеорів. Графік залежності $S_* = S_*(m_*, v_*)$ для першої

групи зір приведений на рис. 3, а. Видно, що вся підвбірка розпадається на два типи залежності — для дуже яскравих зір, зображення яких є перенасиченими, та для середніх і слабких зір (переважна більшість). Для другої групи зір графік має аналогічний вигляд. Якщо вид залежності для середніх та слабких зір легко пояснюється, то для перенасичених зображень хід функції виглядає дивним. Імовірно, той факт, що відгук майже не залежить від швидкості руху яскравих зображень, можна пояснити нелінійною залежністю $V_* \propto E_*^{0.75}$. Фотометричні об'єми V_* (і відповідно S_* та I_*) яскравих зір при зменшенні освітленості пікселя мало змінюються до певної швидкості руху зображення, залишаючись в області малих градієнтів відповідної функції. Однак незрозуміло, чому відбувається зменшення $S_* = S_*(m_*, 0)$. Можливо, причиною тому є вторинні електрони, які не досягають сітки мішені телевізійної трубки та підтримують контраст зображення, одночасно зменшуючи його видимий поперечний розмір. Як було видно з рис. 1, в, найбільш інтенсивне зображення, і відповідно найбільша кількість вторинних електронів спостерігаються у стаціонарному зображенні.

Як видно з рис. 3, а, перенасичені зображення зір (і метеора) не можуть бути адекват-

но використані для коректної фотометрії. Однак зображення, які лежать в неперенасиченій ділянці динамічного діапазону інтенсивності, дозволяють провести коректну фотометрію відносно слабких метеорів, причому видно, що вид функціональної залежності не залежить суттєво від зоряної величини. На рис. 3, б приведено залежність відносних значень $S_*(m_*)/S_*(m_*,0)$ від швидкості руху точкового зображення v_* по кадру. Як видно, дана функціональна залежність є однаковою для об'єктів всіх зоряних величин (в даному діапазоні), тому може бути описана єдиною функцією. Для спрощення перерахунку $S(m,v)$ до $S(m,0)$ можна підібрати апроксимаційну функцію, яка мала б, очевидно, відповідати двом умовам: $S(m,v)/S(m,0)=1$ при $v=0$, та $S(m,v)/S(m,0)\rightarrow 0$ при $v\rightarrow\infty$. Найпростішим випадком такої функції є експонента

$$S_*(m,v)/S_*(m,0) = \exp(-C_*v_*), \quad (1)$$

де $C_* \approx 0.33$ (див. рис. 3, б, пунктирна крива). Дане значення коефіцієнту, імовірно, не є оптимальним через відсутність у тесті значень швидкості для діапазону 10–20 пкл/кадр, і тому погано описує значення функції для найбільших значень швидкості. У першому наближенні цим графіком можна скористатися для фотометрії відносно повільних метеорів, однак найкраще значення для всього діапазону швидкостей дає степенева функція

$$S_*(m,v)/S_*(m,0) = C_B v^{-C_A}, \quad (2)$$

де $C_A \approx 0.51$, $C_B \approx 0.49$ (рис. 3, б, суцільна крива). При цьому слід пам'ятати, що при апроксимації цією функцією $S(m,v)/S(m,0)=1$ при $v \approx 0.25$ пкл/кадр, а не при $v=0$, тобто приведення швидкості іде саме до цього значення. При цьому, очевидно, ми автоматично вважаємо, що $S(m,0) \approx S(m,0.25)$, а на практиці це означає, що при $v < 0.25$ пкл/кадр користуватися цією формулою не можна.

При такому підході єдиною проблемою, що залишається, є той факт, що величина S вимірюється для нерухомих зір з поганою точністю, що пов'язано, напевно, з певною асиметрією зображень зір у парних та непарних полях телевізійного кадру. Калібрувальна крива буде побудована з великими похибками. Значно точніше для них

вимірюється значення фотометричного об'єму V_* . Крім того, саме ця величина безпосередньо пов'язана з освітленістю від об'єкта E_0 . Зважаючи на те, що обидві величини пов'язані між собою, та пропорційні освітленості від об'єкта, спадає на думку проводити для побудови калібрувальної кривої виміри для зір саме величини V_* . А для переведення скоригованих метеорних величин $S_M(m_M,0)$ до $V_M(m_M)$ використати емпіричну залежність між ними, встановленої знову ж таки за рухомими та стаціонарними зображеннями зір. Найпростішим варіантом для переводу $S(m,0)$ у $V(m)$ є використання факту, що просторові зображення зір добре апроксимуються гауссіаною

$$I(x,y) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right),$$

де $I_0 = I(0,0)$. Використовуючи цей факт, можна записати, що $V/S = \sqrt{2\pi}\sigma$, і через цю формулу визначити V через S , якщо використовується аналітична апроксимація контурів зображень. Якщо ж виміри відбуваються спрощено, можна зв'язок між V та S встановити через максимальну інтенсивність зорі над фоном I_0 , яка вимірюється елементарно для кожного зображення зорі $V/S^2 = 1/I_0$.

Однак, як показують вимірювання, залежність V_*/S_* в загальному не є постійною величиною для зір різної зоряної величини, тобто σ змінюється, що знову ж таки пов'язане з конструктивними особливостями ТВ-системи. Тим не менш, як впливає з експериментальних вимірювань V_* та S_* для стаціонарних зір, залежність V_*/S_* від S_* для всього діапазону інтенсивності гарно апроксимується лінійним поліномом

$$V_*/S_* = P_A S_* + P_B, \quad (3)$$

де $P_A \approx 0.0033$, $P_B \approx 2.50$ для нашої системи, і через який на практиці і можна розраховувати V через S . Для середніх та слабких об'єктів $V/S \approx 3...4$, для перенасичених $V/S \approx 5...6$ і, можливо, більше.

ОБГОВОРЕННЯ ТА ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВЕМПІРИЧНОГО МЕТОДУ ФОТОМЕТРІЇ

Коли залежність величини поперечного фотометричного перерізу $S(v)$ від швидкості руху

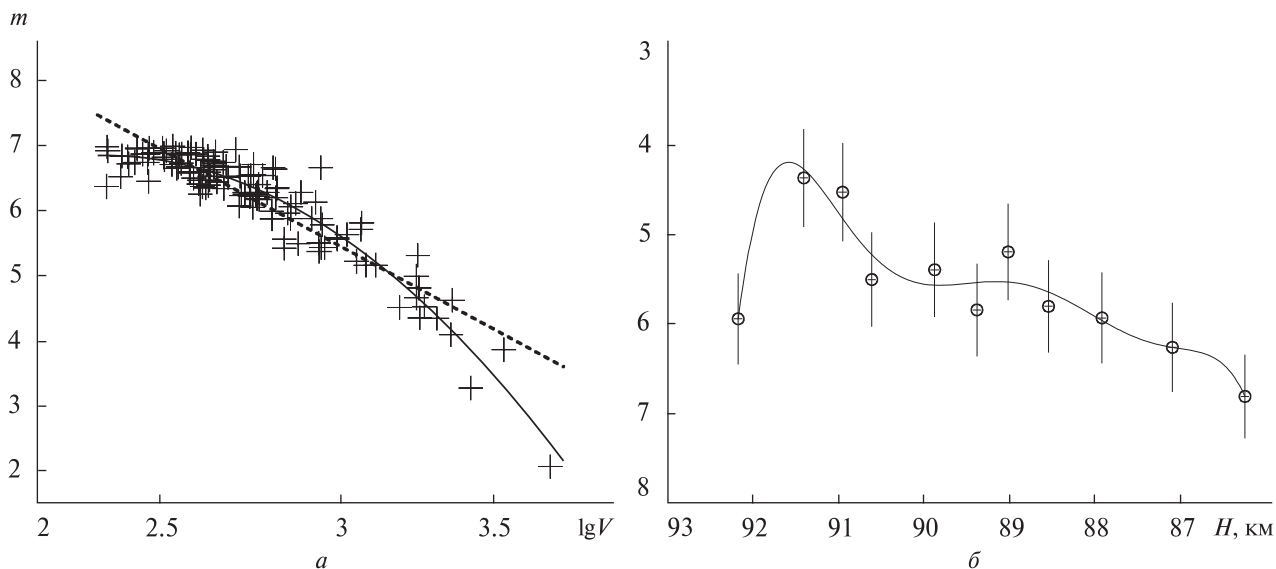


Рис. 4. Калібрувальна крива, побудована за нерухомими фотометричними об'ємами зір порівняння під час спостережень 19 вересня 2013 р. (а). Крива блиску спорадичного метеора, зареєстрованого 19 вересня 2003 р. в $UT = 20^h42^m31^s$ (б)

зображення по кадру ν для даної спостережної системи встановлена виразом (1) чи (2), процес фотометрії метеора виглядає на практиці таким чином. Спрощений варіант полягає в тому, що спочатку для стаціонарних зір порівняння у кадрі, де є метеор (в усередненому кадрі) вимірюються їхні значення $S_*(m_*, 0)$, та з каталогу беруться їхні зоряні величини m_* , за якими будується калібрувальна крива $m_* = m_*(S_*, 0)$. Далі для метеора в кожному кадрі вимірюється значення швидкості зображення метеора по кадру ν_M , та $S_M(m_M, \nu_M)$, а далі за формулою (1) або (2) роблять метеор «нерухомим», тобто обчислюють $S_M(m_M, 0)$. Потім з цим значенням $S_M(m_M, 0)$ входять в калібрувальну криву та отримують зоряну величину метеора m_M .

Більш точний підхід полягає в наступному. Для побудови калібрувальної кривої в усередненому кадрі вимірюються більш точні значення $V_*(m_*)$ для зір порівняння, за якими будується калібрувальна крива $m_* = m_*(\lg V_*)$. Далі виміри поперечних фотометричних профілів $S_M(m_M, \nu_M)$ метеора в кожному кадрі з попередньо виміряними значеннями ν_M перетворюємо за формулою (1) або (2) на $S_M(m_M, 0)$. Потім, скориставшись формулою (3), через $S_M(m_M, 0)$ отримаємо

«фотометричний об'єм нерухомого метеора» $V_M(m_M)$, з яким входимо в калібрувальну криву та обчислюємо m_M .

Для прикладу розглянемо метеор, який було зареєстровано 19 вересня 2003 р. в $UT = 20^h42^m31^s$. Для спостережень використовувався той же об'єктив «Юпітер-3» ($F = 50$ мм, $F/1.5$), що і для тестів. Швидкість руху його зображення складала $\nu \approx 5.14 \pm 1.75$ пкл/кадр ($\nu \approx 8.57 \pm 2.92$ град/с). Було використано калібрувальну криву, приведену на рис. 4 (зліва). Як видно, калібрувальну криву неможливо апроксимувати на всьому динамічному діапазоні прямою, однак непогано підходить квадратичний поліном $m \approx -2.07(\lg V)^2 + 9.20(\lg V) - 3.37$.

ВИСНОВКИ

Описану вище методику фотометрії розроблено в першу чергу для ТВ-систем з трубкою типу ізокон (суперізокон), але через свою універсальність вона може бути використана для будь-якої спостережної відео- чи телевізійної системи. Очевидним недоліком такого напівемпіричного методу є обмежена кількість точок, що відповідає кількості кадрів з метеором, а відтак і точність проведення кривої блиску. Для штучних

супутників Землі ситуація значно краща через їхню суттєво меншу кутову швидкість.

Для спостережних систем з лінійним відгуком на вхідний сигнал можна аналогічно обробляти зображення метеора або супутника в одному просумованому кадрі, де фотометричний пере-різ робити через кожен піксель вздовж траекторії, але порівнювати такі виміри також слід з сумарними кадрами з рухомими зображеннями зір. Правда, при цьому слід пам'ятати, що фотометричний профіль в кожному пікселі не відповідає строго миттєвому значенню зоряної величини світного об'єкта через великий розмір ФРТ для точкових об'єктів.

Ще однією проблемою, яку слід вирішити у майбутньому для системи суперізокон, є яскраві зображення, які мають інший вигляд залежності фотометричних профілів рухомих та стаціонарних об'єктів. В даному прикладі розглянуто досить слабкі метеори діапазону 7—5^m (гранично видимі надслабкі метеори для нашої ТВ-системи мають блиск у максимумі 7^m). Однак для метеорів потоків Леоніди або Персеїди більшість зображень метеорів буде сильно перенасиченою, тому фотометричні дослідження ТВ-системи суперізокон в області яскравих зображень слід продовжити.

1. *Иваников В. И.* О методах фотографической фотометрии метеоров // Бюл. Сталинабадской астрон. обсерватории. — 1957. — № 21. — С. 3—46.
2. *Козак П. Н.* О внутренней точности цифровой фотометрии метеоров по телевизионным наблюдениям // Кинематика и физика небес. тел. — 1998. — **14**, № 6. — С. 553—563.
3. *Козак П. Н.* Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров // Кинематика и физика небес. тел. — 2002. — **18**, № 5. — С. 471—480.
4. *Козак П. Н.* Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений // Кинематика и физика небес. тел. — 2003. — **19**, № 1. — С. 62—76.
5. *Сытинская Н. Н.* Опыт фотографической фотометрии метеоров // Астрон. журн. — 1935. — **12**, вып. 2. — С. 174—199.
6. *Campbell-Brown M. D., Borovicka J., Brown P., Stokan E.* Modelling of meteoroids at high resolution // Abs. Meteoroids. — 2013. — Poznan, Poland, 2013. — P. 23.

7. *Fleming D. E. B., Hawkes R. L., Jones J.* Light curves of faint television meteors // Meteoroids and their parent bodies / Eds J. Stohl, I. P. Williams. — Astronomical Institute of the Slovak Academy of Science, 1993. — P. 261—264.
8. *Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., et al.* Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev // Earth, Moon and Planets. — 1995. — **68**. — P. 297—301.
9. *Hawkes R. L., Mason K. I., Fleming D. E. B., Stultz C. T.* Analysis procedures for two station television meteors // Proceedings International Meteor Conference 1992 / Eds D. Ocanas, P. Zimnikoval. — Antwerpen: IMO Publication, 1993. — P. 28—43.
10. *Hawkes R. L., Bussey J. E., MacPhee S. L., et al.* Technics for high resolution meteor light curve investigations // Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference, Kiruna, Sweden, 6—10 August. — ESA-SP 495 / Ed. Barbara Warmbein. — Kiruna, 2001. — P. 281—286.
11. *Kozak P.* “Falling Star”: Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations // Earth, Moon, and Planets. — 2008. — **102**, N 1—4. — P. 277—283.
12. *Kozak P.* “Falling star”: Software for processing of double-station TV meteor observations // Adv. Meteoroid and Meteor Sci. / Eds J. M. Trigo-Rodrigues, F. J. M. Rietmeijer, J. Llorca, D. Janches. — Springer, 2008. — P. 277—283.
13. *Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., et al.* Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv // Adv Space Res. — 2007. — **39**, N 4. — P. 619—623.
14. *Kozak P. M., Rozhilo A. A., Taranukha Y. G.* Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors // Proceedings of the Meteoroids 2001 conference, Kiruna, Sweden, 6—10 August / Ed. Barbara Warmbein. — 2001. — ESA-SP 495. — P. 337—342.
15. *Kozak P., Rozhilo O., Taranukha Y.* Identification of Radiants of Low-Light-Level Meteors from Double Station TV Observations During Autumn Equinox of 2001 and 2003 // Abs. IAU XXVIII General Assembly, Beijing, China. — 2012. — P. 5963.
16. *LeBlanc A. G., Murray I. S., Hawkes R. L., et al.* Evidence for transverse spread in Leonid meteors // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2000. — **313**. — P. L9—L13.
17. *McCrosky R. E., Posen A.* Special data-reduction procedures for Prairie networks meteor photographs // SAO Special Report. — 1968. — **273**. — P. 1—88.
18. *Murray I. S., Beech M., Taylor M. J., et al.* Comparison of 1998 and 1999 Leonid Light Curve Morphology and Meteoroid Structure // Earth, Moon, and Planets. — 1998. — **82—83**. — P. 351—367.
19. *Pearce G. S.* Simulated meteors observation tests // The astronomer. — 1970. — **7**. — P. 56—58.

20. Spurny P., Betlem H., Jobse K., et al. New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km // MAP. Sci. — 2000. — 35. — P. 1109—1115.
21. Taylor M. J., Gardner L., Murray I., Jenniskens P. Jet-like structures and wake in Mg I (518 nm) images of 1999 Leonid storm meteors // Earth, Moon, and Planets. — 2000. — 82—83. — P. 379—389.

Стаття надійшла до редакції 10.10.14

П. Н. Козак, Л. В. Козак

¹ Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

МЕТОД ФОТОМЕТРИИ СЛАБЫХ МЕТЕОРОВ И ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ С ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ СИСТЕМАМИ СУПЕРИЗОКОН

Предлагается универсальный полуэмпирический метод фотометрии слабых метеоров и искусственных спутников Земли. Метод разрабатывался для фотометрических измерений и редукции изображений, полученных телевизионными наблюдательными системами типа суперізокон, известных своей нелинейностью отклика на входной сигнал и послесвечением динамических изображений в телевизионном кадре. Полуэмпирический подход проявился в том, что фотометрические зависимости телевизионной системы для движущихся и стационарных точечных объектов исследовались путем фотографирования звездного неба камерой, которая вращалась с разными угловыми скоростями, включая нулевую. На основе полученных результатов построена калибровочная кривая и рассчитана кривая блеска для

слабого метеора 4—7^m. Предложенная методика универсальная, и ее можно использовать для фотометрической обработки точечных движущихся светящихся объектов, полученных любой теле- или видеосистемой.

Ключевые слова: метеоры, телевизионные наблюдения метеоров, фотометрия метеоров.

P. M. Kozak, L. V. Kozak

¹ Astronomical Observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv

² Taras Shevchenko National University of Kyiv

METHOD FOR PHOTOMETRY OF LOW LIGHT LEVEL METEORS AND EARTH ARTIFICIAL SATELLITES FROM OBSERVATIONS OF SUPER-ISOCON TV SYSTEMS

A universal semi-empirical method for photometry of low light level meteors and earth artificial satellites is proposed. The method was developed for photometrical measurements and reductions of images obtained with the help of TV systems of super-isocon type known by its non-linear response onto input signal and long afterimage in TV frames from dynamical objects. Semi-empirical approach has appeared in that the photometrical dependencies of TV system for moving and stationary objects were investigated with the test of photographing of star sky with the camera which was rotating with different angular velocity including stationary state. Basing on obtained results the calibration curve was plotted, and the light curve of a meteor from range of 4—7 magnitude was calculated. The proposed method is universal and can be used for photometrical processing of moving irradiated point objects obtained with any TV or video system.

Key words: meteors, TV observations of meteors, meteor photometry.