УДК 523.682.2, 523.683, 523.68-36, 681.785.55

А. Мозгова, канд. фіз.-мат. наук
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
О. Голубаєв, канд. фіз.-мат. наук
Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

МЕТЕОРНА БАЗА ДАНИХ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ У 2019–2021 роках ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІДЕОСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТЕОРНОГО ПАТРУЛЯ ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Проаналізовано Базу даних позиційних і спектральних спостережень метеорів, проведених у 2019–2021 рр. із використанням автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Методами метеорної астрономії визначено кінематичні параметри й елементи геліоцентричних орбіт метеороїдів за даними Бази спостережень.

Описано методику оброблення спектральних відеоспостережень. Для аналізу спектрів метеорів створено програмне забезпечення "AVSMP_Pro v1", що дозволяє генерувати синтетичні спектри та порівнювати їх зі спостережуваними спектрами метеорів. Для визначення хімічного складу метеороїда використовують електронну Базу NIST ASD. Як результат, ми отримуємо інформацію про відносний кількісний хімічний склад метеороїдів і фізичні умови утворення метеорної плазми.

Ключові слова: метеор, спектр, спектральні лінії, інтенсивність спектральних ліній.

Вступ. Метеор являє собою світлове явище і пов'язані з ним фізичні процеси, які є результатом швидкісного (від 11 до 72 км/с) потрапляння метеороїда (продукт розпаду комет та астероїдів) з космосу в газоподібну атмосферу Землі. Маси таких твердих тіл можуть бути в межах 10^{-6}–10^{7} кг, а їхні розміри від 100 мкм до 20 м. Метеорні явища найчастіше відбуваються на висотах 120–80 км, а іноді й вище 120 км.

Хімічний склад комет і астероїдів можна визначати безпосередньо, вивчаючи речовину метеоритів, які випадають на земну поверхню. Однак головний недолік такого підходу полягає у тому, що кількість виявлених метеоритних падінь низька (< 20 %). Спектральні спостереження за метеорами й болідами є одним із шляхів розв'язання цієї проблеми методом класифікації надходження метеорного матеріалу. Спектри метеорів надають інформацію про фізико-хімічні процеси (умови збудження, світіння й іонізацію метеорної плазми, температуру, процеси абляції тощо), що відбуваються під час метеорних явищ в атмосфері Землі [1]. Такі спостереження дають можливість визначати маси метеороїдів, причини і характер протікання спалахів, якісний і кількісний хімічний склад метеорного тіла, а отже, отримувати інформацію про складову ядер комет і астероїдів. Отже, методи метеорної астрономії є потужним доповненням до інших методів астрономії, астрофізики та космічно-технічної галузі, що дозволяють вивчати різноманітну природу тіл Сонячної системи і навіть поза її межами, якщо метеороїди потрапили до Землі з глибокого космосу.

В останні роки широке використання сучасних відеосистем (так званих CCTV-камер) привело до створення баз даних, у яких налічуються сотні тисяч спостережень метеорів за рік в усьому світі. Огляд цих спостережних баз представлено у роботі [2]. Такі бази даних спостережень, зокрема і надають інформацію про рівень метеорної активності протягом року, елементи їхніх геліоцентричних орбіт, а також розподіл метеороїдів за масою і абсолютною світністю та ін. Проте нині все ж дуже мало зібрано спектральних даних для метеорів різноманітних потоків і спорадичного фону. Тому кожен метеорний спектр являє собою значну наукову цінність. В Україні спектральні спостереження метеорів активно проводилися колективами наукових установ, починаючи з 1957 р. до 1990 р., і відновилися лише з жовтня 2018 р. (НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна) із застосуванням сучасних світлочутливих відеокамер і цифрового оброблення результатів спостережень [2, 3].

Статистичне накопичення інформації про фотометричні параметри метеорів і кінематичні характеристики (швидкість, висота, параметри атмосферної траєкторії та ін.) метеорних тіл із подальшим обчисленням геліоцентричних елементів орбіт метеороїдів здійснюють за допомогою відеобазисних (одночасних двобічних або багатостанційних) метеорних патрулів, які дозволяють під час спостережень перекривати значну частину атмосфери на висотах 80–130 км [4].

У цій роботі ми проводимо аналіз накопиченої Бази даних позиційних і спектральних спостережень метеорів, виконаних у 2019–2021 рр. із використанням автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Коротко викладено методику спостережень і оброблення накопиченого спостережного матеріалу.

Метеорний патруль НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна. З метою всебічного вивчення метеорних явищ були організовані дві спостережні станції. Перша розташована у Харкові на території НДІ астрономії, друга – на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії. Геодезичні координати метеорних патрулів визначали за допомогою GPS-навігаторів: "Харків" – широта місця φ = 50°0'9.94" N, довгота місця λ = 36°13'48.67" E, висота місця над рівнем моря – 141 м; "Чугуївська спостережна станція" – широта місця φ = 49°38' 28.61" N, довгота місця λ = 36° 56' 8.62" E, висота місця над рівнем моря – 154 м. Відстань між оптичними приладами становить 64.76 км. Це достатньо для надійного отримання кінематичних характеристик метеорних тіл.

Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль (АВСМП) НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна являє собою оптично-електронний апаратний комплекс із застосуванням CCTV-відеокамер. Як детектори випромінювання використовують CCTV-камери Watec WAT-902H2 ULTIMATE із частотою формування кадрів із зображенням 40 мс$^{-1}$±0.1 мс$^{-1}$ та із часовою роздільною здатністю 20 мс (час формування напівкадру) [4]. У таких камерах використовується CMOS-матриця ICX-249AL ExView розміром 1/2 дюйма. Фізичний розмір одного елемента матриці (пікселя) становить 8.6 × 8.3 мкм. За паспортними даними чутливість камери – 0.0001 Лк (з відносною діафрагмою *F*/1.4), співвідношення сигнал/шум становить більше 46 дБ. Під час спостережень автоматичне підвищення яскравості від-

ISSN 1728-3817

ключене. Телевізійний тюнер із восьмирозрядним АЦП використовується для перетворення аналогового сигналу з камери на цифровий і зберігається у вигляді відеофайлу у форматі AVI. Усі камери оснащено об'єктивами Tamron 12VM1040 ASIR (F = 10 мм, відносна апертура F/1.4), які забезпечують поле зору 34.4° × 25.8°. Отже, для розміру зображення 576 × 768 пікселів, кутовий розмір одного пікселя складає 2.65'. Оптичні пристрої метеорного патруля Чугуївської спостережної станції встановлені на екваторіальне монтування Sky-Watcher EQ6-R і працюють автоматично. У Харкові камера встановлена стаціонарно у напрямку на інший спостережний пункт під кутом близько 70° до горизонту, що забезпечує базисні одночасні спостереження метеорів на лінійних висотах близько 100 км. Одна з камер метеорного патруля Чугуївської спостережної станції оснащена дифракційною ґраткою 500 штрихів/мм для спектральних спостережень. Захоплення відеозображення здійснюється автоматичним реєстратором метеорів UFOCapture (SonotaCo, [5]). Для прив'язки часу метеорних патрулів використовується GPS-модуль NEO-6M і програмна плата Arduino UNO, запрограмована на отримання GPS-сигналу (дата, час, геодезичні координати у системі WGS-84) та передачі цієї інформації пульту управління метеорного патруля.

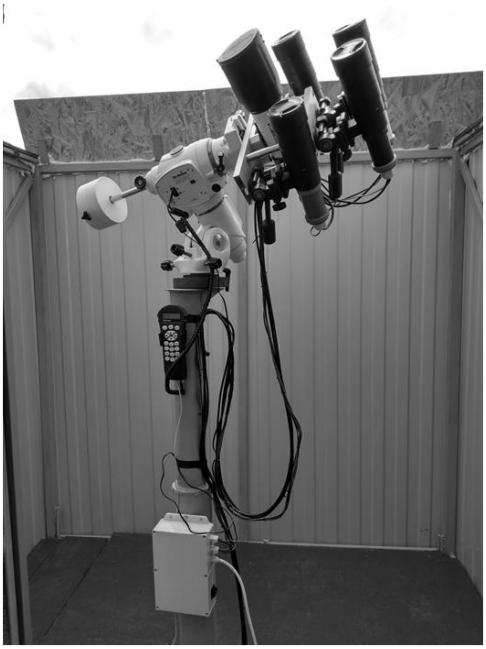

Рис.1. Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна

База даних позиційних спостережень метеорів та їхніх спектрів. Для кожного інструмента АВСМП створено динамічну базу даних, що постійно поповнюється спостережним матеріалом і результатами позиційної, фотометричної та спектральної обробки цього матеріалу. Нині База спостережень метеорів та їхніх спектрів складається з трьох каталогів – окремо для кожної відеокамери, розташованих на Чугуївській спостережній станції, одна з яких забезпечена дифракційною ґраткою, і на території НДІ астрономії в Харкові (відеокамера без дифракційної ґратки). Після ночі метеорного патрулювання у Базу даних надходять відеофільми, що складаються з 50 кадрів до і після появи метеора та кадрів із зображенням самого метеора.

У табл. 1 для кожного інструмента метеорного патруля наведено статистику спостережного матеріалу за період 2019–2021 рр., для яких вже виконано первинне оброблення. У табл. 1 позначено: ChII_no1 та KhII_no1 – оптичні відеокамери без дифракційної ґратки, ChII_sp1 – спектральна камера, тобто відеокамера з дифракційною ґраткою.

***Таблиця* 1**

Статистика спостережного матеріалу у Базі метеорних даних

Оптичний інструмент	Кількість зафіксованих метеорів	Період спостережень	Місце розташування
ChII_no1	1389	19.05.2019 – 22.12.2020	Чугуївська спостережна станція
ChII_sp1	504 (з яких 44 мають яскраві спектри, 12 є базисними)	19.05.2019 –22.12.2020	Чугуївська спостережна станція
KhII_no1	534	19.08.2019 – 16.11.2021	НДІ астрономії, Харків

З табл. 1 видно, що кількість зафіксованих метеорів для KhII_no1 менша приблизно у два рази, ніж для спостережень з аналогічною камерою ChII_no1. Причиною такого факту є сильне світлове забруднення нічного неба у Харкові, де встановлена камера KhII_no1. Так, статистична сумарна величина штучного засвічення неба за рік (у розрахунку на 3.14 км^2 навколо пункту спостережень), дослідженого за допомогою Банку даних Глобальної карти світлового забруднення (Data Bank Global Map of Light Pollution) [6], у місці розташування метеорного патруля Чугуївської спостережної станції становить 3.6×10^{-9} Вт·см$^{-2}$·ср$^{-1}$, а харківського – 1.2×10^{-6} Вт·см$^{-2}$·ср$^{-1}$. Тобто, різ-

ниця у цих значеннях становить три порядки. Для спектральної камери з 504 метеорів тільки 44 мають яскраві спектри (метеори яскравіші за -2^m). Інші спектри дуже слабкі, або зовсім не виділяються у шумі, та непридатні для подальшого оброблення. Крім цього, 12 яскравих метеорів зі спектрами отримано одночасно з двох кореспондуючих пунктів спостереження, а отже для них можна визначити всі кінематичні характеристики, елементи геліоцентричних орбіт і маси метеороїдів.

У табл. 2 наведено статистику метеорних тіл у Базі даних, для яких отримано кінематичні параметри, елементи геліоцентричної орбіти та проведено фотометричне оброблення. В останній графі у дужках вказано кількість зафіксованих спектрів. Невелика кількість метеорних спектрів пояснюється складним процесом отримання спектра, який залежить від багатьох сприятливих умов: яскравість метеора, вірогідність одночасного пролітання метеора у полі зору спектральної і неспектральних камер, вдале розташування спостережуваних спектральних ліній відносно лінії дисперсії ґратки тощо.

***Таблиця* 2**

Статистика метеорних тіл, для яких отримано кінематичні параметри й елементи геліоцентричної орбіти

Назва метеорного потоку	Код	Кількість зафіксованих метеорів (кількість спектрів)
Метеори спорадичного фону	Spo	115 (6)
Perseids	Per	73 (4)
Geminids	Gem	10
Orionids	ORI	5
Sigma Hydrids	HYD	4
August Beta Piscids	BPI	3
November Orionids	NOO	3
Southern Taurids	STA	2 (1)
Southern delta Aquariids	SDA	2
Psi Ursae Majorids	PSU	2
Northern Taurids	NTA	1
December alpha Draconids	DAD	1
Comae Berenicids	COM	1
Eta Eridanids	ERI	1
Leonids	LEO	1 (1)
Kappa Cygnids	KCG	1

Визначення кінематичних характеристик метеороїдів. Методику позиційних вимірювань телевізійних зображень метеорів детально описано в роботі [4]. Для визначення кінематичних характеристик і розрахунків елементів геліоцентричної орбіти метеорних тіл використовують пакет програмного забезпечення, розробленого із цією метою в НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна (автор О. Голубаєв) [4]. Крім цього, як альтернативу використовують програмне забезпечення, розроблене SonotaCo (Японія) [5]:

1. UFOCaptureHD2 і UFOCaptueV2 – для відеоспостережень і попередньої підготовки спостережного матеріалу до аналізу.
2. UFOAnalyzerV2 і UFOOrbitV2 – для фотометрії, розрахунків кінематичних параметрів і обчислень елементів геліоцентричних орбіт метеорних тіл.

Обробка відеофайлів після спостережень включає такі кроки:

1) відбір відеофайлів із метеорами;
2) завантаження даних до ПЗ UFOAnalyzer;
3) введення координат пункту спостережень, даних про камеру й іншої супровідної інформації;
4) введення інформації про поле зору й орієнтацію відеокамери;
5) астрометричне налаштування;
6) фотометричне калібрування;
7) збереження та встановлення профілю для пакетного оброблення зображень зір і метеорів;
8) перевірка результатів;
9) збереження результатів і завантаження даних до програми UFOOrbitV2 для подальших обчислень: отримання даних про кінематичні параметри метеорного тіла (траєкторія у земній атмосфері, лінійна висота, швидкість, координати на небесній сфері метеорного радіанта, елементи геліоцентричної орбіти та ін.) і фотометричних параметрів метеорів (абсолютний блиск, зміна блиску із часом).

Як приклад на рис. 2 зображено розташування на небесній сфері метеорних радіантів за спостереженнями у 2019–2020 рр. Виділяється група радіантів метеорів, що належать метеорному потоку Персеїди, а на рис. 3 зображено геліоцентричні орбіти відповідних метеорних частинок потоку Персеїди. Цей метеорний потік породжений кометою 109/Swift-Tuttle. Таким чином, фізико-хімічні властивості метеороїдів цього потоку дають нам уявлення про властивості речовини ядра цієї комети.

Методика оброблення метеорних спектрів, отриманих за допомогою АВСМП. База даних АВСМП включає також спостережний відеоматеріал метеорних спектрів за період 2019–2021 рр. і результати його обробки. Статис-

тика спектральних спостережень представлена у табл. 1 і 2. Як бачимо із цієї статистики, яскравий і придатний для обробки спектр технічно важко отримати за допомогою тільки однієї спектральної камери. Тому в майбутньому планується збільшити кількість відеокамер, оснащених спектральними ґратками, а отже збільшити за рахунок цього покриття спостережної зони.

Спектр метеора є сукупністю емісійних ліній. Загальна енергія випромінювання метеора розподіляється у безперервному спектрі слабкої яскравості й порівняно невеликій кількості монохроматичних зображень. Якісний аналіз спектрів полягає у вимірюванні спектрів уздовж дисперсії, визначенні довжин хвиль кожної емісійної лінії і ототожненні ліній хімічних елементів, що входять до складу метеороїда та земної атмосфери.

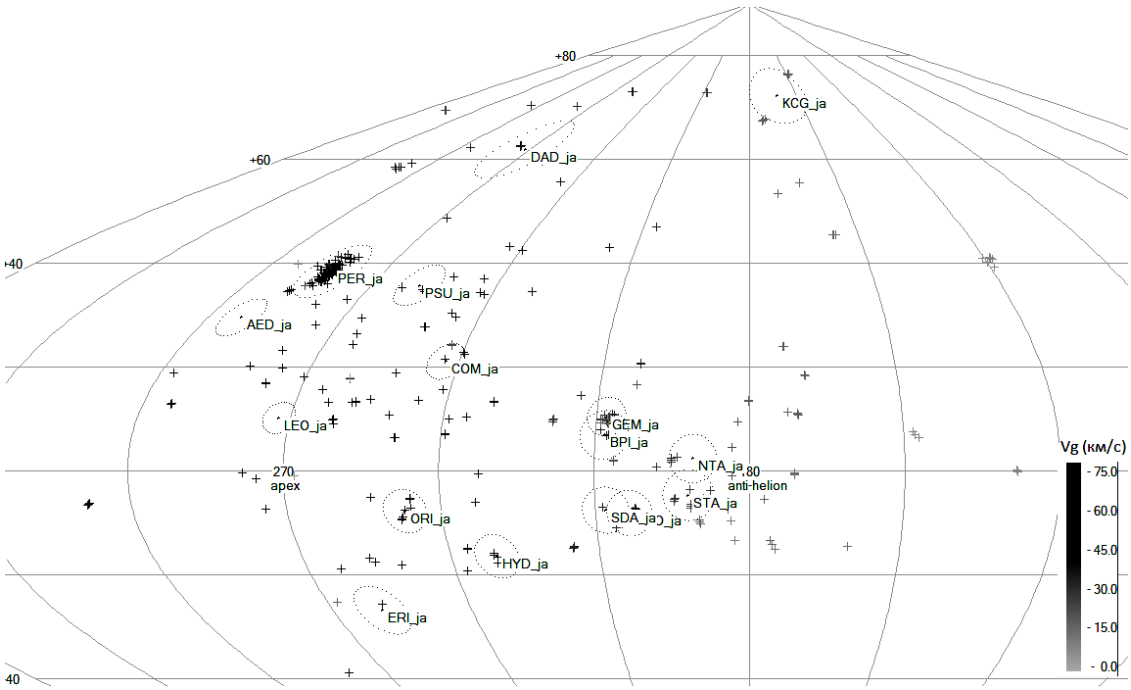

Рис. 2. Радіанти метеорів, зафіксованих у 2019–2020 рр. із використанням АВСМП.
Положення радіантів зображено у екліптичній системі координат відносно екліптичної довготи Сонця ($L_R - L_S$)

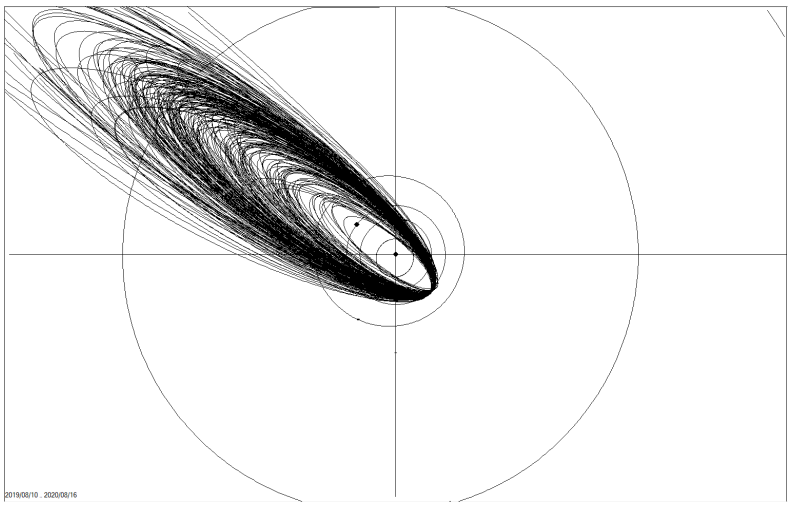

Рис. 3. Геліоцентричні орбіти метеорних тіл потоку Персеїди,
розраховані за спостереженнями у 2019–2020 рр. із використанням АВСМП

Для ототожнення хімічного складу метеороїдів у спектрах спостережених метеорів, використовують програмне забезпечення "AVSMP_Pro v1" (автори О. Голубаєв, А. Мозгова), яке автоматизує цей процес і дає змогу обробляти великі обсяги даних. Оброблення відео з метеорним спектром проводиться за такими кроками.

1. Під час спостережень отримують відеофільм, що містить 50 кадрів (тривалістю 2 с) до початку метеорного явища, кадри з метеорним спектром, а також 50 (чи більше) кадрів після метеорного явища. В останньому, це роблять для випадку, коли спостерігається тривале післясвітіння метеорного сліду.

2. Відеофільм розбивають на окремі оригінальні кадри, сформовані за 40 мс. Перші 50 кадрів до метеорного явища підсумовують та усереднюють ("сумарний кадр").

3. Від оригінального кадру зі спектром метеора віднімають сумарний кадр. У результаті такої операції вилучають зображення зір і дефектні пікселі, які постійно присутні на кожному кадрі, а отже залишається тільки зображення метеорного спектра на фоні фотометрично рівного, але зашумленого поля.

4. Проводять сканування частини зображення зі спектром, у результаті якого отримують спектрограму метеора. Під час цієї процедури вводять поправки, які враховують різні геометричні і фотометричні апаратні спотворення. Для отримання дискретної спектрограми, оцифровують частину зображення спектра, повернуту на деякий кут до осі абсцис (рис. 4а). Цей кут визначають із поздовжнього переміщення зображення метеора. Отже, зображення ліній будуть розташовані під кутом 90° до осі абсцис. Далі створюється спектрограма шляхом підсумовування значень пікселів у кожному стовпці вибраної частини зображення. Отримана дискретна спектрограма апроксимується кубічним сплайном і гаусіаною для подальшого аналізу.

5. Виконують процедуру виділення корисного сигналу метеорного спектра із зображення спектра з накладеними на нього шумами різної природи. Так, під час формування сумарного кадру (див. крок 2) в окремий файл записують середнє значення яскравості кожного пікселя і середньоквадратичне відхилення від середнього значення у коливанні яскравості пікселя. В останньому випадку рівень фонового шуму може досягати 15σ (рис. 4б, 4в) [7]. Виділяють корисний сигнал такий, що вищий за значенням на 1σ від середньоквадратичного відхилення.

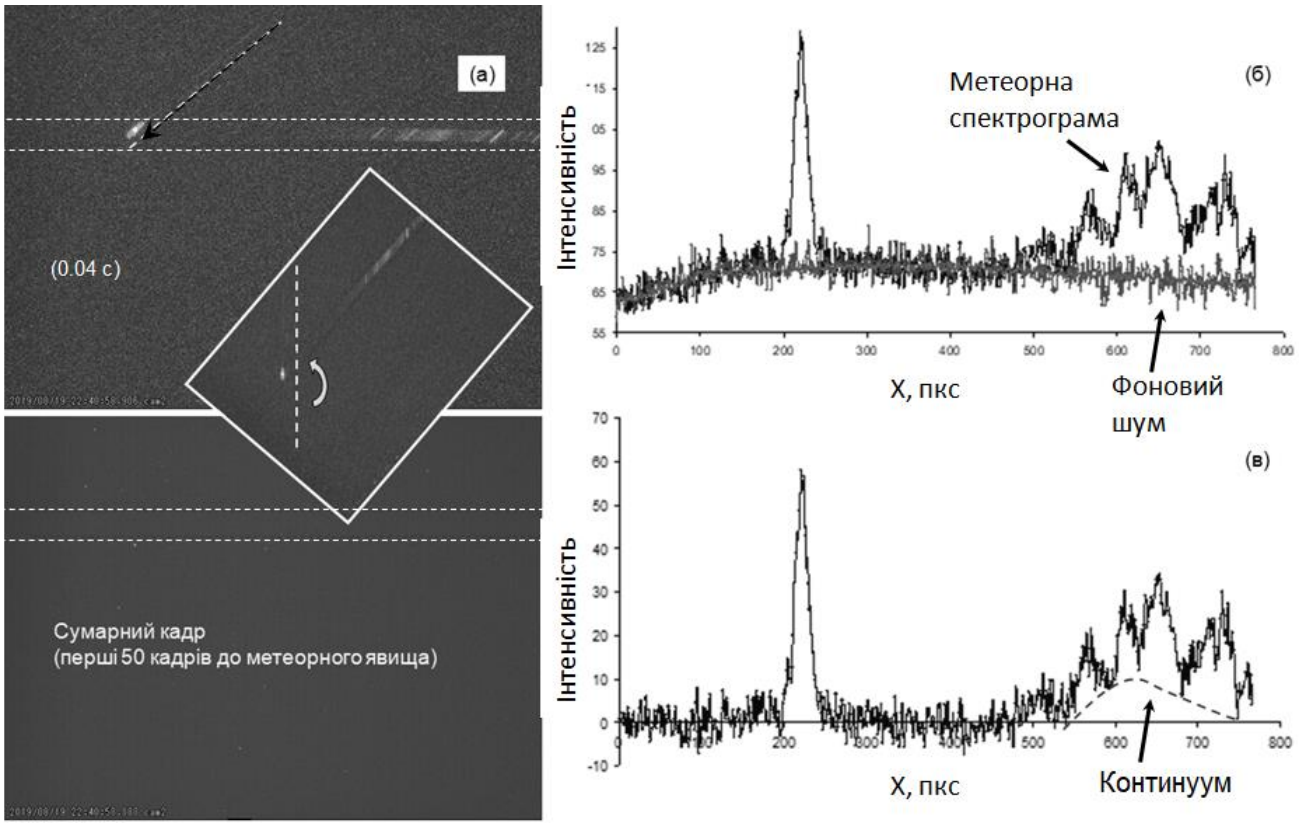

Рис. 4. До методики первинного оброблення відеозображення зі спектром метеора й отримання спектрограми: (а) – угорі зображення одного з кадрів відеофільму зі спектром метеора, сформованого за 0.04 с. Пунктирними лініями показано межі зображення метеорного спектра, а пунктирною стрілкою – напрямок переміщення метеора. На вставці зображено поворот кадру на кут, що дорівнює куту, під яким метеор рухається відносно осі абсцис. Внизу показано сумарне зображення за першими 50 кадрами до появи метеора. Пунктирними лініями вказано межі, що відповідають вибраній області зі спектром метеора; (б) – метеорна спектрограма й розподіл фонового шуму під метеорним спектром; (в) – зашумлена метеорна спектрограма

6. Проводять прив'язку відносних відліків спектрограми за довжинами хвиль. Для цього після отримання метеорної спектрограми здійснюють ототожнення довжин хвиль, порівнюючи спектр метеора зі спектром еталона, в якому точно відомі довжини хвиль спектральних ліній. Зазвичай, для цього використовують найбільш яскраві та відомі лінії у спектрі метеора (нейтральні атоми кисню, азоту, натрію, магнію, заліза), довжини хвиль яких відомі з достатньою точністю. Виконують вимірювання спектрограми – отримують довжини хвиль λ спектральних ліній і відповідні їм відносні відліки шкали n_i (відстань від певного нуль-пункту до спектральних ліній). У результаті одержують залежність у вигляді градуйованої кривої спектрограми $\lambda = f(n)$. Ця залежність визначає масштаб досліджуваної ділянки спектра – так звану обернену дисперсію ділянки спектрограми. Обернену дисперсію визначають за формулою (1):

$$D = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_2 - n_1}, \qquad (1)$$

вимірюють, як правило, у нанометрах на 1 мм (нм/мм). У випадку цифрового зображення вимірюють у нанометрах на 1 піксель (нм/пкс). Дифракційний спектр має сталу дисперсію D вздовж усієї спектрограми.

ISSN 1728-3817

7. На спектрограмі віднімають суцільний спектр, або континуум (на рис. 4в показано пунктирною лінією), підбираючи значення вірогідної температури метеорної коми. Згідно з формулою Планка, розподіл енергії в суцільному спектрі нагрітого газу метеорної коми визначається температурою

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}, \quad (2)$$

де h – стала Планка ($6.625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); c – швидкість світла у вакуумі ($3 \cdot 10^8$ м·с$^{-1}$); k – стала Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$); λ – довжина хвилі випромінювання, м; T – абсолютна температура, К.

Значення температури підбирають так, щоб крива Планка якнайкраще описувала вільні від яскравих ліній частини ділянки метеорної спектрограми (рис. 4в). Абсолютна температура, знайдена таким чином, надалі використовується у першому наближені під час розрахунків синтетичного спектра метеора для визначення кількісного вмісту хімічних елементів у метеороїді.

8. Проводять абсолютне калібрування спектрограми.

Відеоспектральна апаратура характеризується відносною спектральною чутливістю, яку треба врахувати під час визначення відносної та абсолютної інтенсивності спектральних ліній. Для цього необхідно отримати спектр еталонного джерела випромінювання, для якого відомий розподіл енергії у спектрі. Нормування метеорного спектра здійснюється діленням спектра метеора на спектр порівняння. Далі знайдену функцію спектральної чутливості $f(\lambda)$ використовують для калібрування інтенсивностей емісійних ліній у спектрі метеора. У метеорній спектроскопії абсолютну інтенсивність спектральних ліній, зазвичай, виражають в ерг·с$^{-1}$·нм$^{-1}$·ср$^{-1}$. Після отримання сканованого зображення метеорного спектра та його калібрування, враховуючи різноманітні геометричні і фотометричні спотворення, здійснюється детальна ідентифікація спектральних ліній, виконується пошук нових емісійних ліній, визначаються їхні абсолютні інтенсивності, розраховуються фізичні параметри метеорних тіл та ін.

На рис. 5а показано криву (суцільну лінію) спектральної чутливості відеокамери WATEC 902H2 (CMOS-матриця ICX-249AL ExView), яка обмежується чутливістю на довжинах хвиль близько 1000 нм. Пропускна спектральна характеристика УФ фільтра обмежує чутливість камери на довжинах хвиль близько 350 нм (на рис. 5а пунктирна лінія).

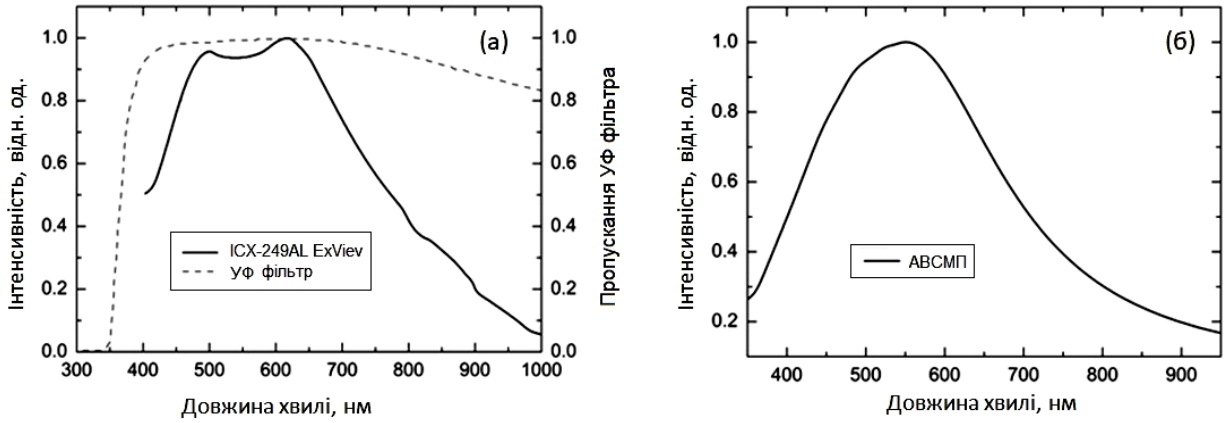

Рис. 5. (а) – суцільна лінія – крива спектральної чутливості відеокамери WATEC 902H2 (CMOS матриця ICX-249AL ExView), пунктирна лінія – пропускна спектральна характеристика УФ фільтра; (б) – спектральна калібрувальна функція АВСМП

Як калібрувальне джерело ми використали Юпітер. Спектральну калібрувальну функцію системи $f(\lambda)$ розраховано за формулою

$$f(\lambda) = \frac{DO}{DC[\text{ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}]}, \quad (3)$$

де DO – інтенсивність випромінення спектра Юпітера у відносних одиницях під час спостережень за допомогою АВСМП; DC – інтенсивність випромінення Юпітера в абсолютних одиницях [ерг·с$^{-1}$·см$^{-2}$·нм$^{-1}$].

Дані DC отримано множенням сонячного спектра в інтервалі 300–1000 нм поза земною атмосферою [8] на альбедо Юпітера. Значення альбедо Юпітера взято з роботи [9].

Густина потоку $F(\lambda)$ випромінення метеорних спектрів у абсолютних величинах отримують із використанням кривої спектральної калібрувальної функції системи $f(\lambda)$:

$$\frac{F(\lambda)}{\text{ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}} = \frac{OMS}{f(\lambda)}, \quad (4)$$

де OMS – інтенсивність випромінення спектра Юпітера у відносних одиницях під час спостережень за допомогою АВСМП.

Отже, отримуємо нормовану на одиницю у своїх максимумах спектральну калібрувальну функцію спостережної телевізійної спектроскопічної системи АВСМП із використанням ґратки 500 штрихів/мм (рис. 5б).

9. Ототожнюють спектральні лінії щодо їхньої приналежності до атомів, іонів і молекул хімічних елементів, із використанням Бази даних спектральних ліній NIST ASD [10]. Результат оброблення метеорного спектра заносять до Бази даних спостережень АВСМП. Далі проводять якісний і кількісний аналіз отриманих результатів.

Визначення хімічного складу метеороїдів. Для якісного й кількісного аналізу хімічного складу метеороїда за його метеорною спектрограмою використовуємо синтетичний спектр, який розраховано за формулою

$$I_{nr} = \frac{1}{4\pi}\frac{hcN_0}{\lambda Z} g_n A_{nr} \exp\left(-\frac{E_n}{kT_{\text{еф}}}\right), \quad (5)$$

де I_{nr} – інтенсивність спектральної лінії; h – стала Планка ($6.625\cdot10^{-34}$Дж·с); c – швидкість світла у вакуумі ($3\cdot10^8$ м·с$^{-1}$); k – стала Больцмана ($1.38\cdot10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$); λ – довжина хвилі випромінювання, м; N_0 – загальна кількість атомів цього елемента у випромінювальному об'ємі; g_n – статична вага рівня n; E_n – енергія збудженого верхнього стану, Z – сума за станами; A_{nr} – коефіцієнт Ейнштейна; $T_{\text{еф}}$ – ефективна температура, К.

Усі необхідні параметри для конкретної спектральної лінії взято з електронної Бази даних NIST ASD [10]. Припускається, що у метеорній плазмі виконуються умови локальної термодинамічної рівноваги. У такому випадку ефективна ($T_{\text{еф}}$) й електронна температури (T_e) будуть рівні за значенням, а отже з формули (5) можна визначити загальну кількість атомів хімічного елемента у випромінювальному об'ємі. Змінюючи інтенсивність різних атомних синтетичних спектральних ліній метеора й атмосферного кисню й азоту, можна розділити на окремі спектральні лінії складні метеорні спектри з емісіями, що являють собою сукупність ліній різних хімічних елементів. Для перевірки та коректності розрахунків результати отриманих синтетичних атомних спектрів порівнювали з результатами, отриманими за допомогою програмного забезпечення [11].

На спектрограмах метеорів крім ліній нейтральних атомів та іонів різних хімічних елементів присутні молекулярні смуги атмосферного азоту N_2, модельні розрахунки якого, проводять за допомогою програмного забезпечення PGOPHER [12].

Як приклад, на рис. 6а показано калібровану за описаною методикою спектрограму метеора M20190819_224058 (суцільна крива) і синтетичний спектр (штрихована крива) з ототожненими атомами й іонами хімічних елементів. За допомогою програмного забезпечення "AVSMP_Pro v1" у спектрі метеора ототожнено спектральні лінії, які належать атомам хімічних елементів FeI, CaI, MgI, SiI, NaI, іонам SiII, атомам атмосферного походження OI, NI та молекулярні смуги атмосферного азоту N_2 на проміжку довжин хвиль 600–700 нм. На рис. 6б зображено розраховані за синтетичним спектром інтенсивності окремих спектральних ліній цих хімічних елементів.

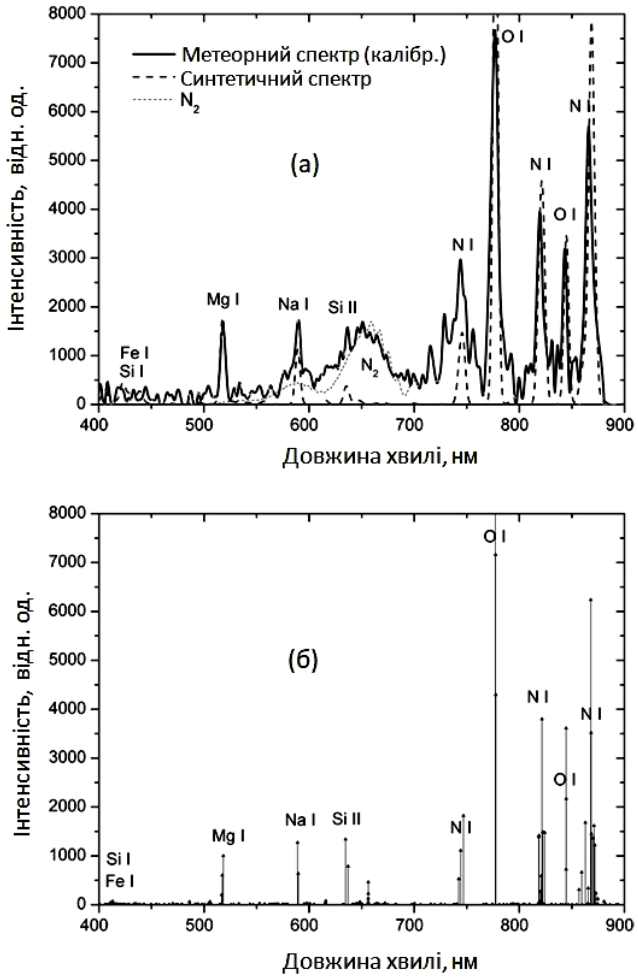

Рис. 6. (а) – калібрована спектрограма метеора M20190819_224058 (суцільна крива, синтетичний спектр (штрихована крива) з ототожненими атомами й іонами хімічних елементів, модель молекулярного спектра азоту N_2 (пунктирна крива); (б) – ототожнені спектральні лінії атомів хімічних елементів, які розраховані за синтетичним спектром

Знайдена загальна кількість атомів певного хімічного елемента у випромінювальному об'ємі дає можливість розрахувати відносні значення концентрацій Fe, Mg, Na, Ca, Si та ін., а отже визначити до якого загального класу (залізний, залізо-силікатний чи силікатний) належить метеороїд. Але треба зауважити, що описана методика кількісного аналізу хімічного складу метеорного тіла належить до безеталонного методу, коли розрахунки дуже чутливі до точності визначення температури. У такому випадку похибки абсолютних значень концентрацій елементів можуть досягати десятків відсотків (в окремих випадках більше 30–50 відсотків). Тому питання безеталонного методу визначення хімічного складу метеорних тіл ще потребує подальшого вирішення. Як альтернативу для кількісного аналізу на практиці знаходять значення відносних інтенсивностей ліній FeI-15 (530 нм), MgI-2 (516.7 нм), NaI-1 (588.9 нм), Ca I-2 (422.6 нм) [13, 14]. Це також відображає інформацію про класифікацію метеороїда.

Кінематичні параметри й геліоцентрична орбіта метеора потоку Персеїди (M20190819_224058) 19 серпня 2019 р. Далі представлено результати, виконані за описаною вище схемою, оброблення позиційних і спектральних спостережень на прикладі метеора M20190819_224058 за Базою даних спостережень метеорів АВСМП. Явище відбулось 19 серпня 2019 р. о $22^h40^m58^s$ UT під час активності метеорного потоку Персеїди. Спостерігачі – Олександр Голубаєв, Альона Мозгова. Спостереження метеора були базисними, тому є можливість визначити елементи геліоцентричної орбіти метеорного тіла. Спектр та інтегральне зображення яскравого метеора показано на рис. 7а, б, в.

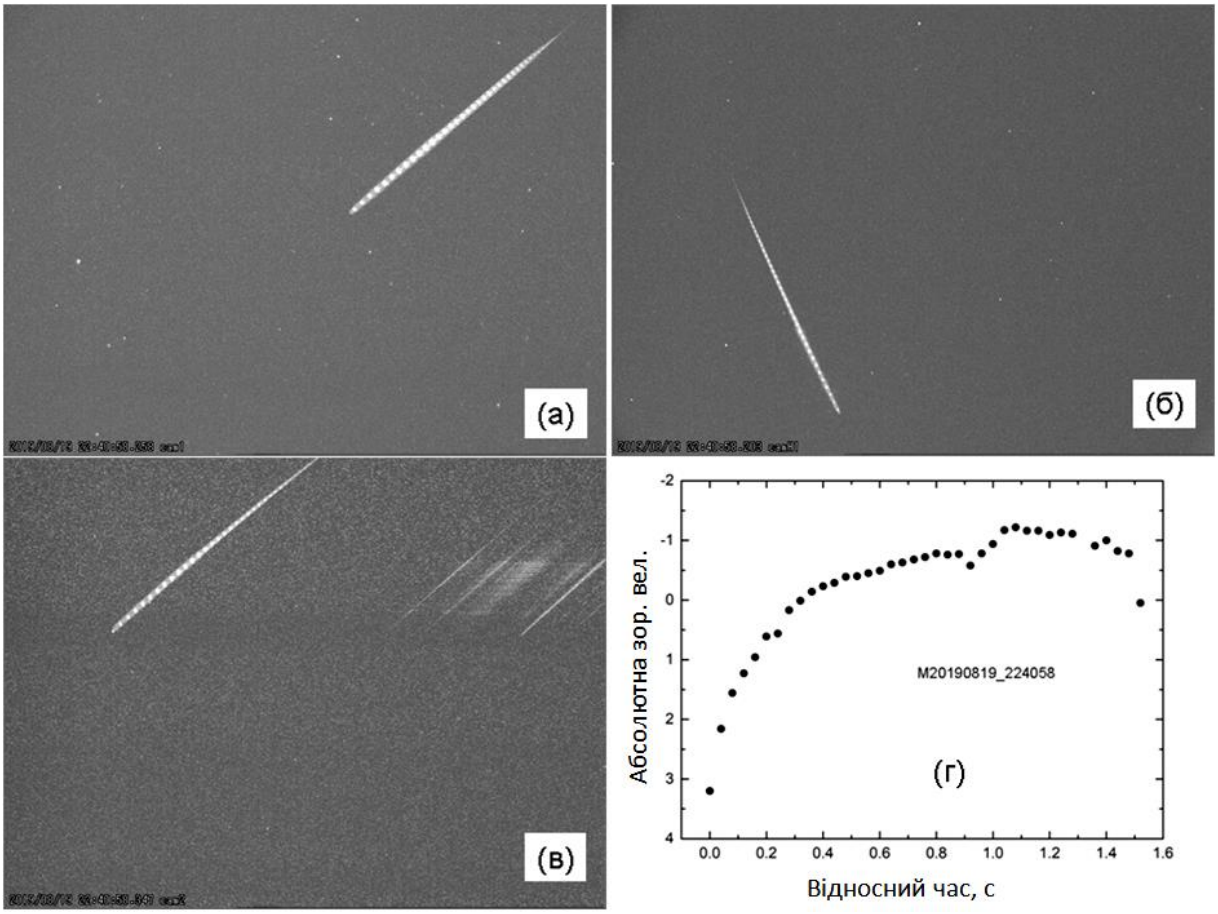

Рис. 7. Метеор (M20190819_224058) потоку Персеїди 19 серпня 2019 р.:
(а) – спостереження на Чугуївській спостережній станції; (б) – спостереження у Харкові; (в) – спектр метеора;
(г) – зміна абсолютної зоряної величини метеора із часом

У табл. 3–5 наведено основні кінематичні параметри і геліоцентричні елементи орбіти метеорного тіла M20190819_224058, що належав до потоку Персеїди (# PER).

***Таблиця* 3**

(lng1, lat1, H1) і (lng2, lat2, H2) – геодезичні координати і висота метеорного тіла M20190819_224058 у початковий і кінцевий моменти спостережень явища; к. град – кутові градуси

Дата (UTC) рік	місяць	день	Час (UTC), год	хв	с	lng1, к. град	lat1, к. град	H1, км	lng2, к. град	lat2, к. град	H2, км
2019	08	19	22	40	58	36.97	50.01	116.1	36.64	49.83	80.1

Таблиця 4

Координати радіанта метеора M20190819_224058. MJD – модифікована Юліанська дата; Sol – довгота Сонця; Ra0, Dc0 – екваторіальні координати радіанта; Rat, Dct – виправлені екваторіальні координати радіанта; elng, elat – екліптичні координати радіанта; к. град – кутові градуси;

MJD	Sol	Ra0	Dc0	Rat	Dct	elng	elat
59746.58676	146.39	58.20	57.84	58.73	57.93	69.91	36.66

Таблиця 5

Геліоцентричні орбітальні параметри (J2000) метеороїда M20190819_224058. Vi, Vg, Vs – позаатмосферна, геоцентрична, геліоцентрична швидкості (км·с$^{-1}$); a – велика піввісь (а.о); q – перигелійна відстань (а.о); *e* – ексцентриситет; ω – аргумент перигелія; к. град – кутові градуси; Ω – довгота висхідного вузла; *i* – кут нахилу орбіти

Vi км·с$^{-1}$	Vg км·с$^{-1}$	Vs км·с$^{-1}$	*a* а.о.	*q* а.о.	*e*	ω к. град	Ω к. град	*i* к. град	Метеорний потік
59.73	58.52	39.97	5.69	0.93	0.84	145.998	146.39	114.92	PER_ja

На рис. 7г зображено криву зміни блиску метеора із часом. Тривалість метеорного явища становить близько 1.6 с. Якщо знехтувати гальмуванням сферичного метеорного тіла, тоді можна оцінити його фотометричну масу (M_{ph}) у грамах. Залежність між M_{ph}, силою світла I (ерг·с$^{-1}$·ср$^{-1}$) і швидкістю V_∞ (км·с$^{-1}$) описують формулою

$$4\pi I = -\tau \frac{V_\infty^2}{2} \frac{dM_{ph}}{dt}. \qquad (6)$$

У роботі використано коефіцієнт ефективного випромінювання $\tau = 0.002$ [15, 16, 17].

Сумарне значення темпу сублімації метеорного тіла dM/dt дає M_{ph} приблизно 0.08 г. Якщо прийняти для нього мінералогічну густину, характерну для Персеїд [18] $\rho = 1.2$ г·см$^{-3}$, тоді розмір метеороїда становив близько 0.5 см.

Висновки. У роботі описано Базу даних позиційних і спектральних спостережень метеорів, проведених у 2019–2021 рр. за допомогою метеорного патруля НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Виконано оброблення спостережень метеора M20190819_224058, що був зафіксований камерами АВСМП 19 серпня 2019 р. о $22^h40^m58^s$ UT під час активності метеорного потоку Персеїди. Методами метеорної астрономії досліджено його кінематичні і фізико-хімічні властивості. Проведено аналіз ототожнених емісійних ліній, виявлених у метеорному спектрі, і створено їхній каталог. Результати оброблення, що представлені в роботі, показують узгодженість із роботами інших авторів і даними інших баз, наприклад NIST ASD. Отже, програмне забезпечення "AVSMP_Pro v1", розроблене авторами цієї статті для оброблення метеорних спектрів, може застосовуватися для подальшої роботи з рештою спостережного матеріалу в Базі даних АВСМП. Розроблене ПЗ постійно оновлюється залежно від задач, які потрібно розв'язувати.

Роботу виконано:

- НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна – частково в межах договору № БФ/32-2021 на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напряму "Математичні науки та природничі науки" Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України;
- Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка – у межах держбюджетної теми 22БФ023-02 "Діагностика пилу в активних малих тілах Сонячної системи та навколоземному космічному просторі" за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України, та частково в межах виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напряму "Математичні науки та природничі науки" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Список використаних джерел

1. Мозгова А. М. Речовинний склад вибраних метеорів за дистанційними спектральними спостереженнями. Дисертація. Київ. – 2018. – 133 с.
2. Голубаєв О. В., Горбаньов Ю. М., Шульга О. В., Андрєєв О. А., Бушуєв Ф. І., Відьмаченко А. П., Грудинін Б. О., Жиляєв Б. Ю., Калюжний М. П., Козак П. М., Куліченко М. О., Малиновський Є. В., Мозгова А. М., Савчук С. Г., Стєклов О. Ф., Сумарук Ю. П., Янків-Вітковська Л. М. Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості // Косм. наука і технол. – 2022. – 28 (4). – С. 39–70.
3. Голубаєв О., Мозгова А. Перші результати спостережень метеорних явищ за допомогою автоматизованого відео-спектрального метеорного патруля Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна // Вісник Київського нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2019. – 59 (1). – С. 41–48.
4. Голубаєв О. В. Кінематичні та фізичні характеристики метеорних тіл з радіантами поблизу Сонця за даними наземних телевізійних спостережень. Дисертація. Київ. – 2017. – 195 с.
5. UFO Capture is motion capture software. Електронний ресурс: http://sonotaco.com/e_index.html (last accessed – 24.01.2022).
6. Data Bank Global Map of Light Pollution, www.lightpollutionmap.info
7. Gorbanev Y. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V. et al. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors // Sol Syst Res. – 2006. – 40. – P. 412–426.
8. Wehrli 1985, AM0 Spectrum. Електронний ресурс: http://rredc.nrel.gov/solar/standards/am0/wehrli85.txt
9. Karkoschka Erich. Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titanat 300 to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum // Icarus. – 1994. – Vol. 111, Iss. 1. – P. 174-192.
10. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8), [Online]. Available: https://physics.nist.gov/asd [2020, November 15]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
11. Електронний ресурс: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

12. Colin M. Western, Luke Carter-Blatchford, Patrick Crozet, Amanda J. Ross, Jérôme Morville and Dennis Tokaryk. The spectrum of N2 from 4500 to 15700 cm^{-1} revisited with PGOPHER // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2018. – Vol. 219. – P. 127–141.
13. Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R. Catalogue of representative meteor spectra // A&A. – 2015. – 580, A67. – P. 31.
14. Sekiguchi Takashi. Results of spectral observations of meteor showers and sporadic meteors from October 2018 until May 2020 // eMeteor News. – Vol. 5, no. 5. – P. 300–313. https://www.meteornews.net
15. Spurny P. Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993-1996 // Planetary and Space Science. – 1997. – Vol. 45, Iss. 5. – P. 541–555. DOI: 10.1016/S0032-0633(97)00006-8,
16. Campbell-Brown M.D., Koschny D., 2004. Model of the ablation of faint meteors. Astronomy and Astrophysics, Volume 418, p.751–758. DOI: 10.1051/0004-6361:20041001-1
17. Kozak P. M. Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classic heights // Kinematika i fizika nebesnyh tel (Online). – 2019. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 62–79.
18. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I. Densities and porosities of meteoroids // A&A. – 2009. – 495. – P. 353–358.

References

1. Mozgova A. M. (2018). Material composition of meteors by remote spectral observations. [Unpublished doctoral dissertation]. National Aviation University.
2. Golubaev A.V., Gorbanev Yu.M., Shulga O.V., Andreev O.A., Bushuev F.I., Vidmachenko A.P., Hrudynin B.O., Zhilyaev B.E., Kaliuzhnyi M.P., Kozak P.M., Kulichenko M.O., Malynovskyi Ye.V., Mozgova A.M., Savchuk S.G., Steklov A.F., Sumaruk Yu.P., Yankiv-Vitkovska L.M. Creation of the Ukrainian meteor observation network: instruments, methods for processing, observatin possibilities // Space Sci. & Technol – 2022. – 28 (4). – P. 39–70.
3. Golubaev A., Mozgova A. The first results of meteor phenomena observations using automated video-spectral meteor patrol of V.N. Karazin Kharkiv National University // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2019. – 59 (1). – P. 41–48.
4. Golubaev A.V. (2017). Kinematic and physical characteristics of meteoroids with radiants near the Sun according to terrestrial television observations. [Unpublished doctoral dissertation]. National Aviation University.
5. UFO Capture is motion capture software. Електронний ресурс: http://sonotaco.com/e_index.html (last accessed – 24.01.2022).
6. Data Bank Global Map of Light Pollution, www.lightpollutionmap.info
7. Gorbanev Y. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V. et al. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors // Sol Syst Res. – 2006. – 40. – P. 412–426.
8. Wehrli 1985, AM0 Spectrum. Електронний ресурс: http://rredc.nrel.gov/solar/standards/am0/wehrli85.txt
9. Karkoschka Erich. Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titanat 300 to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum // Icarus. – 1994. – Vol. 111, Iss. 1. – P. 174-192.
10. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8), [Online]. Available: https://physics.nist.gov/asd [2020, November 15]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
11. Електронний ресурс: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
12. Colin M. Western, Luke Carter-Blatchford, Patrick Crozet, Amanda J. Ross, Jérôme Morville and Dennis Tokaryk. The spectrum of N2 from 4500 to 15700 cm^{-1} revisited with PGOPHER // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2018. – Vol. 219. – P. 127–141.
13. Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R. Catalogue of representative meteor spectra // A&A. – 2015. – 580, A67. – P. 31.
14. Sekiguchi Takashi. Results of spectral observations of meteor showers and sporadic meteors from October 2018 until May 2020 // eMeteor News. – Vol. 5, no. 5. – P. 300–313. https://www.meteornews.net
15. Spurny P. Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993-1996 // Planetary and Space Science. – 1997. – Vol. 45, Iss. 5. – P. 541–555. DOI: 10.1016/S0032-0633(97)00006-8,
16. Campbell-Brown M.D., Koschny D., 2004. Model of the ablation of faint meteors. Astronomy and Astrophysics, Volume 418, p.751–758. DOI: 10.1051/0004-6361:20041001-1
17. Kozak P. M. Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classic heights // Kinematika i fizika nebesnyh tel (Online). – 2019. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 62–79.
18. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I. Densities and porosities of meteoroids // A&A. – 2009. – 495. – P. 353–358.

Надійшла до редколегії 27.11.22

A. Mozgova, PhD
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
A. Golubaev, PhD
Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

THE METEOR DATABASE OF OBSERVATIONS IN 2019–2021 WITH THE AUTOMATICAL VIDEO AND SPECTRAL METEOR PATROL OF V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY

The Database of positional and spectral observations of meteors in 2019–2021 using the automatical video and spectral meteor patrol of the Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University has analyzed. The kinematic parameters and elements of the heliocentric orbits of meteoroids were calculated using the methods of meteor astronomy according to the Observation Database.

This work describes the methods of processing of spectral video observations. The software "AVSMP_Pro v1" for meteor spectra analysis has been created that allows to generate synthetic spectra and compare them with observed meteor spectra. The data from the NIST ASD electronic database (https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html) is used for obtaining the composition of chemical elements in the meteoroid. As a result, we obtain an information about the relative quantitative chemical composition of meteoroids and the physical conditions of meteor plasma formation.

Keywords: meteor, spectrum, spectral lines, intensity of spectral lines.