

<https://doi.org/10.15407/knit2024.04.058>
УДК 523.682.2 / .683/ .68-36 + 681.785.55

О. В. ГОЛУБАЄВ¹, нач. спостережної станції, наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3265-5285>
E-mail: alexandr_sky1@ukr.net

А. М. МОЗГОВА², мол. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8490-4327>
E-mail: alenamozgova@ukr.net

¹ Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

² Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053

КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ, ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД ВИБРАНИХ МЕТЕОРНИХ ТІЛ

Вступ. Метеороїди, досягаючи Землі та вторгаючись у її атмосферу, створюють метеори. Кінематичні параметри, фізичні характеристики та хімічний склад спостережених метеорних тіл дають інформацію про властивості їхніх батьківських тіл — комет і астероїдів. З іншого боку, ці параметри можуть відображати фізичні умови перебування метеороїдів у різних ділянках Сонячної системи та поза її межами.

Методи. Метеорні дані, проаналізовані в роботі, отримані зі спостережень за допомогою автоматизованого відео-спектрального метеорного патруля Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Методи метеорної астрономії та спектроскопії дають можливість визначити кінематичні параметри, фізичні властивості та хімічний склад досліджуваних метеороїдів.

Результати. У роботі представлено результати досліджень метеорів, яскравіших за 0^m , які були зафіксовані базисним способом і для яких виконано спектральні спостереження. Для вибраних 12 метеорів отримано координати метеорних радіантів на небесній сфері, параметри атмосферних траєкторій метеорних тіл, геліоцентричні орбітальні параметри на епоху J2000. За фотометричними даними визначено позаатмосферні маси метеороїдів. Проведено аналіз ототожнених емісійних ліній, виявлених у метеорних спектрах. Для цього застосовувалось програмне забезпечення, розроблене авторами роботи для обробки метеорних спектрів. Проведено якісний та кількісний аналіз хімічного складу метеорних тіл. Під час кількісного аналізу визначалися величини відносних інтенсивностей ліній Fe I-15, Mg I-2, Na I-1.

Висновки. Представлені в роботі кінематичні характеристики і елементи геліоцентричних орбіт вказують на те, що спостережені метеорні тіла належать метеорним потокам Персеїди, Леоніди, Південні Тауриди. Деякі метеорні тіла є спорадичними. Розраховані маси метеороїдів, хоч і мають варіацію значень, але в цілому узгоджуються з даними інших дослідників у інтервалі абсолютних значень яскравості метеорів $-2^m \dots +1.5^m$. Виявлено, що деякі з досліджених метеорних тіл мають незначний вміст заліза або натрію у своєму хімічному складі.

Ключові слова: метеор, метеороїд, геліоцентрична орбіта, маса, спектр, спектральні лінії, хімічний склад.

Цитування: Голубаєв О. В., Мозгова А. М. Кінематичні параметри, фізичні характеристики та хімічний склад вибраних метеорних тіл. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 4 (149). С. 58—72. <https://doi.org/10.15407/knit2024.04.058>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ВСТУП

Згідно з офіційно визначеною термінологією метеором називається світлове явище і пов'язані з ним фізичні процеси, які є результатом швидкісного (від 11 до 72 км·с⁻¹) потрапляння метеороїда (продукту розпаду комет чи астероїдів) з космосу у газоподібну атмосферу Землі. Метеори найчастіше відбуваються на висотах 120...80 км, а іноді й вище 120 км.

Статистичне накопичення інформації про фотометричні параметри метеорів і кінематичні характеристики (швидкість, висота, параметри атмосферної траєкторії тощо) метеорних тіл із подальшим обчисленням геліоцентричних елементів орбіт метеороїдів здійснюється за допомогою базисних (одночасних двобічних або багатостанційних) метеорних патрулів, які дозволяють під час відео- або фотоспостережень перекривати значну частину атмосфери на висотах 80...130 км.

Кінематичні параметри, фізичні характеристики та хімічний склад спостережених метеорних тіл дають інформацію про властивості їхніх батьківських тіл — комет і астероїдів, а з іншого боку можуть бути проявом фізичних умов перебування у різних ділянках Сонячної системи, і навіть поза її межами. Наприклад, автори публікацій [5, 7, 10, 13, 17] вказують на наявність залежності складу хімічних елементів (особливо легких Na і K, а також Mg, Fe) у метеорних тілах від перигелійної відстані їхніх орбіт. Цей факт розглядається як результат теплового впливу (термічна десорбція) на метеороїди під час їхнього наближення до Сонця на невеликі відстані. Ця обставина вимагає проведення статистичного аналізу наявної бази спостережених даних і теоретичного обґрунтування знайдених закономірностей. З іншого боку, є можливість вивчення навколосонячної пилової речовини методами метеорної астрономії, зокрема методами наземних оптичних спостережень метеорів.

Метеорні дані, проаналізовані в цій роботі, було отримано зі спостережень за допомогою автоматизованого відео-спектрального метеорного патруля (АВСМП) Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Детально ме-

тодику спостережень і обробки накопиченого спостережного матеріалу наведено у роботі [4]. У даній роботі для аналізу ми відібрали яскраві метеори (яскравіші за 0^m), які було зафіксовано базисним способом і для яких одночасно є дані спектральних спостережень. Такий комплексний набір спостережної інформації дає можливість визначити у повній мірі кінематичні параметри, фізичні характеристики та хімічний склад досліджених метеороїдів.

МЕТОДИ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Повну інформацію про метеорний патруль подано в роботах [2, 4]. Зазначимо лише основні та важливі характеристики відеоспектрального спостережного комплексу. З метою всебічного вивчення метеорів було організовано два спостережні кореспондентні пункти. Перший розташований у Харкові на території НДІ астрономії, другий — на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії. Геодезичні координати метеорних патрулів визначалися за допомогою GPS-навігаторів: «Харків» — широта місця $\varphi = 50^{\circ}00'09.94''$ пн. ш., довгота місця $\lambda = 36^{\circ}13'48.67''$ сх. д., висота місця над рівнем моря — 141 м; «Чугуївська спостережна станція» — широта місця $\varphi = 49^{\circ}38'28.61''$ пн. ш., довгота місця $\lambda = 36^{\circ}56'08.62''$ сх. д., висота місця над рівнем моря — 154 м. Відстань між оптичними приладами становить 64.76 км. Цього достатньо для надійного отримання кінематичних характеристик метеорних тіл.

Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль (АВСМП) НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна — це оптично-електронний апаратний комплекс із застосуванням ССТV-відеокамер. Як детектори випромінювання використовуються ССТV-камери Watec WAT-902H2 ULTIMATE із частотою формування кадрів зображень 40 ± 0.1 мс⁻¹ та із часовою роздільною здатністю 20 мс (час формування півкадру) [1]. 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 відключене. Телевізійний тюнер із восьмирозрядним АЦП використовується для перетворення аналогового сигналу з камери у цифровий, який зберігається як відеофайл формату AVI. Усі камери оснащено об'єктивами Tamron 12VM1040 ASIR ($F = 10$ мм, відносна апертура $F/1.4$), які забезпечують поле зору $34.4 \times 25.8^\circ$. Отже, для розміру зображення 576×768 пкл, кутовий розмір одного пікселя становить $2.65'$. Оптичні пристрої метеороного патруля Чугуївської спостережної станції встановлені на екваторіальне монтування Sky-Watcher EQ6-R і працюють автоматично. У Харкові камеру встановлено 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. Одну з камер метеороного патруля Чугуївської спостережної станції оснащено дифракційною ґраткою 500 штрихів/мм для спектральних спостережень. Захоплення відеозображення здійснюється автоматичним реєстратором метеорів UFOCapture (SonotaCo) [15]. Для прив'язки часу метеороних 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 на пульт управління метеороного патруля.

Для автоматизації процесу відеоспостережень, попередньої підготовки спостережного матеріалу до аналізу, для первинної фотометрії, розрахунків кінематичних параметрів і обчислень елементів геліоцентричних орбіт метеороних тіл ми використали програмне забезпечення UFOAnalyzerV2 і UFOOrbitV2, розроблене SonotaCo [15]. Дане програмне забезпечення є поширеним не тільки серед аматорів, але і серед спеціалістів у метеороній астрономії, тому що воно створене на високому професійному рівні і дозволяє швидко опрацьовувати великий об'єм відеоінформації під час спостережень (це сотні відеофайлів за сеанс спостережень, які потрібно проглянути і відсіяти файли з хибними сигналами). Методика обробки астроінформації, закладена у кодї про-

грамного пакету, є класичною, а точність результатів роботи ПЗ є коректною. Далі, для перевірки первинної обробки, контролю та необхідної корекції розрахунків кінематичних характеристик і елементів геліоцентричних орбіт метеороних тіл, уточнення попередніх фотометричних вимірів, детального аналізу самого метеора з точки зору фізики явища використовується пакет програмного забезпечення [1] власної розробки авторів даної роботи.

Для первинної обробки зображень метеороних спектрів, аналізу ототожнених емісійних ліній, виявлених у спектрах, розрахунків кількісного хімічного складу метеороїдів ми використовуємо програмне забезпечення AVSMP_Pro v1, розроблене також авторами цієї статті. Деталі про методику вимірювань та обчислень, закладену у вказаному ПЗ, приведено у роботі [4]. Програмний пакет автоматизує процес вимірювань і розрахунків та включає такі процедури: виділення корисного сигналу з фону шумів різної природи, корекції спектрограми за різноманітні геометричні і фотометричні спотворення оптико-електронними компонентами АВСМП, віднімання неперервного та атмосферного випромінювання, калібрування спектрограми за довжинами хвиль, оцінка ефективної температури метеороної плазми, віднімання від метеороного спектра смуг першої позитивної системи молекулярного азоту (N_2) атмосферного походження, розрахунок синтетичного спектру, ототожнення хімічних елементів у метеороному спектрі та визначення їхнього кількісного складу тощо.

У даній статі ми представляємо результати обробки базисних спостережень, фотометрії та кількісний аналіз спектрів вибраних 12 метеорів (яскравіших за 0^m), отриманих за допомогою АВСМП.

РЕЗУЛЬТАТИ

Кінематичні характеристики і геліоцентричні орбітальні параметри метеороїдів. Табл. 1—3 містять результати вимірювань та розрахунків координат метеороних радіантів, параметри атмосферних траєкторій метеороних тіл, геліоцентричні орбітальні параметри спостережених метеороїдів на епоху (J2000). Ці параметри вка-

зують на те, що спостережені метеори (табл. 4) належать метеорним потокам та їхнім батьківським кометам: Персеїди (109P/Swift — Tuttle), Леоніди (55P/Tempel — Tuttle), Південні Тауриди (2P/Encke). Деякі метеорні тіла не було ототожено з відомими метеорними потоками, тому є спорадичними.

Крім основних параметрів метеорів, до табл. 2 ми внесли дані про кутову висоту, на якій спостерігався кожен метеор. Ці значення викорис-

товувались для абсолютної фотометрії кривих блиску метеорів та під час процедури корекції метеорних спектрограм за екстинцію атмосфери як функції довжини хвилі. Також вище зазначалося, що спостерігається залежність концентрації елементів у хімічному складі метеорних тіл (особливо легких Na і K) від перигелійної відстані. Тому ми наводимо в табл. 3 перигелійні відстані для досліджуваних метеорних тіл як важливу характеристику.

Таблиця 1. Координати метеорних радіантів (J2000) (*MJD* — модифікована Юліанська дата, λ_{Sol} — довгота Сонця, α , δ — екваторіальні координати радіанта, V_g — геоцентрична швидкість)

#	Дата (UTC)	UTC	<i>MJD</i>	λ_{Sol} , град.	α , град.	$\Delta\alpha$, град.	δ , град.	$\Delta\delta$, град.	V_g , км/с	ΔV_g , км/с
1	2019-08-19	22:33:14	58714.94	146.3871	294.8	2.6	-14.3	3.8	10.2	1.9
2	2019-08-19	22:40:58	58714.95	146.3923	58.7	0.1	57.9	0.0	58.5	0.2
3	2019-08-20	19:25:49	58715.81	147.2240	327.0	0.2	80.4	0.1	38.4	0.2
4	2019-11-21	21:02:56	58808.88	238.9780	69.9	2.9	15.2	3.7	25.7	4.9
5	2019-11-24	03:56:13	58811.16	241.2894	156.8	0.3	19.1	0.7	67.6	1.0
6	2020-06-25	22:30:54	59025.94	94.5269	304.6	0.4	59.6	0.2	36.7	0.4
7	2020-08-07	21:15:50	59068.89	135.5270	31.3	0.5	23.2	0.5	63.0	1.2
8	2020-08-12	23:54:28	59074.00	140.4284	49.3	1.0	59.0	0.4	54.8	2.8
9	2020-08-12	23:55:35	59074.00	140.4291	48.9	1.1	58.2	0.2	57.1	1.4
10	2020-08-13	01:26:36	59074.06	140.4898	48.3	0.4	58.1	0.2	58.1	0.6
11	2020-08-16	00:32:34	59077.02	143.3360	53.6	27.2	62.0	11.0	39.0	21.4
12	2020-09-23	19:51:46	59115.83	180.9589	311.7	0.4	-17.9	1.0	9.5	0.6

Таблиця 2. Параметри атмосферних траєкторій метеорних тіл (V_∞ — позаатмосферна швидкість метеороїда, Z_R — зенітна відстань метеорного радіанту, $(\lambda_1, \varphi_1, H_1)$ і $(\lambda_2, \varphi_2, H_2)$ — геодезичні координати і лінійна висота метеорних тіл у початковий і кінцевий моменти спостережень явища)

№	V_∞ , км/с	Z_R , град.	Кутова висота метеора, град.	λ_1 , град.	φ_1 , град.	H_1 , км	λ_2 , град.	φ_2 , град.	H_2 , км
1	14.9	62.5	71	36.5737	49.7338	78.7	36.7392	49.8366	69.9
2	59.5	41.7	70	36.9743	50.0125	116.1	36.6346	49.8294	80.1
3	40.0	31.4	68	36.6472	49.9909	106.5	36.6099	49.863	82.6
4	28.2	35.6	77...78	36.837	49.5002	79.9	36.7493	49.6004	61.9
5	68.6	30.5	69...74	36.4947	49.7065	110.2	36.5	49.8056	91
6	38.4	13.5	74...78	36.6415	49.653	96.8	36.6099	49.6274	81.8
7	64.2	64.9	74...85	36.9252	49.6078	101	36.6037	49.5803	89.9
8	56.0	30.9	68...73	36.6661	49.8828	109.7	36.5147	49.8092	86.7
9	58.3	30.6	80...85	36.8782	49.725	110.5	36.7154	49.6496	85.9
10	59.2	18.4	82...83	36.9772	49.786	119.8	36.8511	49.7237	85.2
11	40.6	26.7	80...81	36.8776	49.7842	97.2	36.6382	49.6419	50.8
12	14.6	57.3	72...73	36.5182	49.5945	89.1	36.6074	49.7274	78.6

Маси метеорних тіл. В основі методики для розрахунку позаатмосферної маси (фотометрична маса) метеорного тіла лежить припущення, що у світність метеора переходить деяка частина його кінетичної енергії. Вважатимемо, що метеороїд має сферичну форму. Знехтуємо гальмуванням метеорного тіла і приймемо, що його швидкість (V , км·с⁻¹) у будь-який момент часу (t , с) під час руху у земній атмосфері дорівнює позаатмосферній швидкості (V_∞ , км·с⁻¹), виправлений за всі гравітаційні і геометричні спотворення, тобто $V = V_\infty = \text{const}$. Тоді фотометричну масу (m_{ph}) метеорної частинки у грамах можна оцінити за відомою спрощеною формулою:

$$4\pi I = -\tau \frac{V^2}{2} \frac{dm_{ph}}{dt}, \quad (1)$$

де I — сила світла (ерг·с⁻¹·ср⁻¹). У роботі використано коефіцієнт ефективного випромінювання $t = 0.002$ [6, 8, 16].

Найчастіше у сучасних каталогах метеорних спостережень, які можуть налічувати сотні тисяч метеороїдів з обчисленими кінематичними і орбітальними параметрами, не вказано мас метеороїдів, розрахованих за повною кривою блиску метеорів, обмежуючись лише значенням яскравості метеора у максимумі блиску. Це ускладнює можливість статистичного порівняння різних баз спостережень, коли йдеться про поширеність

у Сонячній системі речовини метеороїдів за їхніми масами та хімічним складом. Проте з рівнянь класичної теорії метеорної фізики у припущенні відомої моделі «А» метеора можна оцінити масу частинки за емпіричною формулою, запропонованою у роботі [18]. У монографії [3] це питання також розглянуто у систематизованому вигляді, де було отримано формулу на основі аналізу фотометричних мас яскравих метеорів і вважається, що дана формула дозволяє з достатньою точністю визначити початкові значення мас метеорних тіл (m_{emp}):

$$m_{emp} = \frac{1.62 \cdot 10^{25} \cdot 2.512^{-M_{max}}}{V_\infty^4 \cos Z_R}, \quad (2)$$

де m_{emp} — маса метеорної частинки у грамах, M_{max} — абсолютна зоряна величина метеора у максимумі блиску, V_∞ — позаатмосферна швидкість метеорної частинки (см·с⁻¹), Z_R — зенітна відстань радіанта.

У роботі [18] порівняння значень емпіричних мас, обчислених за формулою (2), із фотометричними масами для 170 метеорних тіл, показало, що у 80 % з них емпіричні маси відрізняються від фотометричних не більше, ніж удвічі, і ця різниця залежить від швидкості метеороїда. Емпіричні маси є нижньою межею мас частинок. Крім цього, припускається можлива залежність такої межі від хімічного складу метеороїдів.

Таблиця 3. Геліоцентричні орбітальні параметри (J2000) метеороїдів

(a — велика піввісь, q — перигелійна відстань, e — ексцентриситет, ω — аргумент перигелія, Ω — довгота висхідного вузла, i — кут нахилу орбіти, Δ — похибка визначення параметрів)

№	a , а. о.	Δa , а. о.	q , а. о.	Δq , а. о.	e	Δe	ω , град.	$\Delta\omega$, град.	Ω , град.	i , град.	Δi , град.
1	1.92	0.36	0.920	0.020	0.522	0.093	222.6	2.6	146.3878	2.1	1.0
2	5.64	0.65	0.933	0.001	0.835	0.018	146.0	0.5	146.3923	114.9	0.2
3	5.09	0.25	1.010	0.000	0.801	0.010	175.0	0.1	147.2240	65.4	0.1
4	1.73	14.16	0.396	0.071	0.770	0.123	112.1	6.0	58.9800	7.0	3.7
5	2.57	0.71	0.987	0.000	0.616	0.081	180.4	1.8	241.2902	164.3	1.1
6	6.01	0.98	1.013	0.000	0.832	0.025	186.9	0.5	94.5268	61.8	0.4
7	1.71	0.33	0.899	0.023	0.474	0.076	229.7	7.9	135.5270	161.3	0.9
8	2.81	39.67	0.926	0.023	0.670	0.181	141.8	9.0	140.4284	108.9	2.3
9	4.56	39.86	0.940	0.010	0.794	0.100	146.7	3.3	140.4292	111.7	1.0
10	7.21	39.09	0.949	0.003	0.868	0.049	149.7	1.2	140.4898	112.4	0.5
11	0.85	366.83	0.578	0.293	0.324	1.050	40.8	53.4	143.3360	87.5	37.0
12	2.54	0.26	0.965	0.003	0.620	0.039	205.6	1.2	180.1745	0.0	0.2

З урахуванням хімічного складу значення емпіричних мас можуть збільшитися у 1.5...2 рази. Тому ми мали на меті, крім іншого, перевірити коректність використання у подальших дослідженнях емпіричної формули (2) шляхом порівняння m_{emp} зі значеннями m_{ph} .

З іншого боку, ми припускаємо, що і у формулі (1) коефіцієнт ефективного випромінювання (τ) також має неявну залежність від хімічного складу метеорної частинки. Це припущення впливає з того, що за своїм фізичним змістом коефіцієнт ефективного випромінювання показує ту частину кінетичної енергії, яка витрачається на розігрівання та високотемпературне випаровування поверхневого шару метеорного тіла, тобто визначає термодинамічні і кінетичні властивості речовини метеороїда. Тому врахування хімічного складу метеорного тіла у формулі (1) може вплинути на значення обчисленої фотометричної маси. Але перевірити такі припущення можливо буде тільки після отримання статистично значущої кількості спектральних спостережень метеорів і моделювання їхніх кривих блиску з врахуванням спектральних спостережень, що є темою наступних досліджень.

У табл. 4 наведено результати розрахунків мас за формулами (1) і (2) для спостережених нами

Таблиця 4. До розрахунку маси метеорних тіл (M_{max} — абсолютна яскравість метеора у максимумі блиску)

№	Метеорний потік	M_{max}	m_{emp} , г	m_{ph} , г (Чугуїв)	m_{ph} , г (Харків)
1	Spo	1.2 ^m	2.36	0.57	(0.146)*
2	PER	-1.5	0.07	0.09	0.10
3	Spo	-0.3	0.10	0.05	0.10
4	STA	-0.2	0.38	0.97	(0.1)*
5	LEO	-0.9	0.02	0.03	0.04
6	Spo	0.4	0.05	0.05	0.09
7	Spo	-1.1	0.06	0.40	0.05
8	PER	-0.8	0.04	0.05	(0.02)*
9	PER	-1.1	0.04	0.05	0.06
10	PER	-0.1	0.02	(0.02)*	0.10
11	Spo	0.3	0.05	0.04	0.04
12	Spo	0.5	4.16	0.57	0.72

Примітка: * — залишкове значення маси, отримане за неповною видимою частиною метеора або за наявності хмарності під час спостережень.

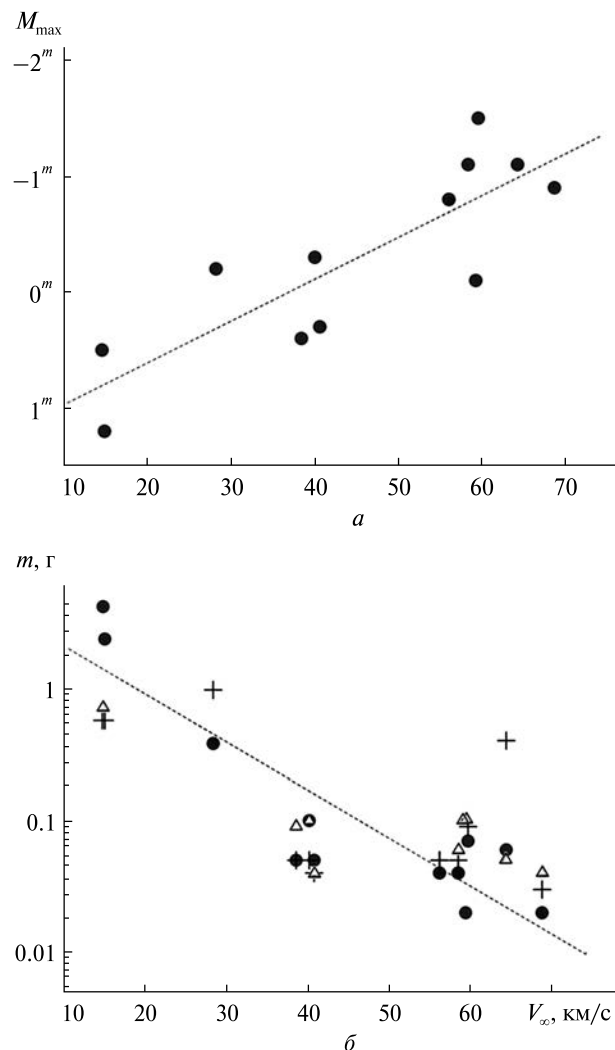


Рис. 1. Залежності від позаатмосферної швидкості V_{∞} метеорного тіла абсолютної зоряної величини M_{max} у максимумі блиску метеора (а) та маси m метеорного тіла (б), розрахованої за емпіричною формулою (2) (точки) та за формулою (1) (хрестики — дані Чугуївського пункту, трикутники — дані Харківського пункту)

вибраних 12 метеорних тіл. Фотометрична маса розраховувалася окремо за кривими блиску, отриманими зі спостережень на Чугуївській спостережній станції та НДІ астрономії у Харкові. Для візуалізації на рис. 1, а показано залежність M_{max} метеора від V_{∞} метеорного тіла, яка демонструє добре відому закономірність — яскравість метеора у максимумі блиску збільшується зі збільшенням значення V_{∞} метеорної частинки. На рис. 1, б

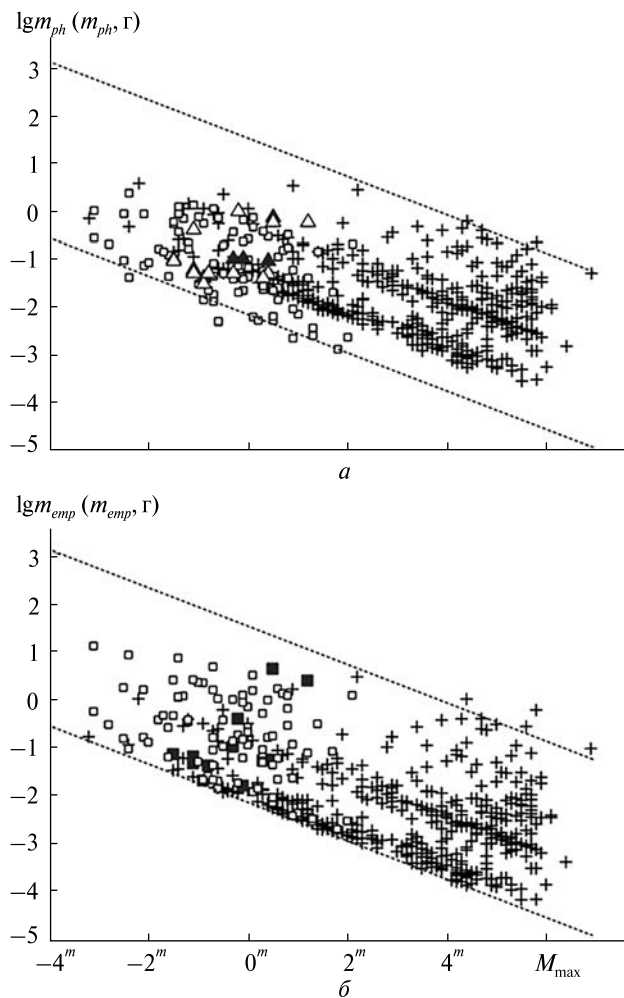


Рис. 2. Залежність фотометричної маси $lg m_{ph}$ (а) і емпіричної маси $lg m_{emp}$ (б) метеорних тіл від абсолютної зоряної величини метеора у максимумі блиску M_{max} : темні трикутнички — за даними АВСМП-Харків, світлі трикутнички — за даними АВСМП-Чугуїв, темні квадратики — емпірична маса (АВСМП), хрестики — каталог MSSWG [11]; світлі квадратики — каталог [17]. Пунктирні лінії — межі можливих значень мас метеороїдів

показано функціональну залежність маси метеороного тіла, розраховану за формулами (1) і (2), від його швидкості в атмосфері. Бачимо, що за виключенням кількох оцінок, у загальному випадку значення мас, розраховані за обома формулами, узгоджуються між собою. Але особливо велика різниця у значеннях мас m_{ph} і m_{emp} помітна для першого і останнього спорадичних метеорів, наведених у табл. 4. Причому значення m_{emp} значно

(у 4 і 6.5 разів відповідно) перевищують m_{ph} . Для цих метеорних тіл характерна дуже низька позаатмосферна швидкість ($V_{\infty} = 14...15 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$).

Залежність фотометричної маси m_{ph} спостережених за допомогою АВСМП метеорних тіл від абсолютної зоряної величини метеорів у максимумі блиску (M_{max}) зображено на рис. 2, а. Для порівняння на цю ж діаграму нанесено значення фотометричних мас метеорних частинок з Базисних даних орбіт MSSWG (MSSWG Orbit Database) [11], яка містить відеодані про 3533 метеори від яскравих (-4^m) до досить слабких ($+7^m$) за спостереженнями з 3 січня 1983 року по 21 жовтня 2009 року з кількох станцій Робочої групи семінару з досліджень метеорів MSSWG (Meteor Science Seminar Working Group) у Японії [12]. До 1992 року група займалася базисними (двостанційними) фотоспостереженнями метеорів, а з 1993 року — телевізійними спостереженнями метеорів [14]. Для порівняльного аналізу з усього каталогу ми відібрали 464 метеори, для яких похибка положення радіантів і геоцентричної швидкості метеорних тіл не перевищувала 3 %, а значення ексцентриситету геліоцентричної орбіти $e < 1$. У каталозі вказано значення геоцентричної швидкості (V_g) метеороїдів, але вони мало відрізняються від V_{∞} , і тому це не впливає суттєво на результати статистичного порівняння з іншими каталогами. Крім цього, на рис. 2, а наведено дані з репрезентативного каталогу 84 метеорів (від $+2^m$ до -3^m), опублікованого в [17]. Каталог містить результати базисних спектральних (із низькою роздільною здатністю) відеоспостережень та вказано дані про фотометричні маси метеорних тіл.

Як видно з діаграми (рис. 2, а) значення мас метеороїдів, розраховані зі спостережень, отриманих за допомогою АВСМП, хоч і варіюють, але в цілому узгоджуються зі спостереженнями інших досліджень в інтервалі абсолютних значень яскравості метеорів $-2^m...+1.5^m$. Крім того, видно загальний зв'язок між абсолютною зоряною величиною метеора у максимумі блиску і масою метеороного тіла, але для одного і того ж значення яскравості метеора маса частинки може варіювати в залежності від швидкості у межах 3-4 порядків.

Залежність мас (m_{emp}) метеорних тіл, розрахованих за формулою (2), від абсолютної зо-

ряної величини метеорів показана на рис. 2, б. На рис. 2 пунктирними лініями позначено межі можливих значень мас метеороїдів в залежності від позаатмосферної швидкості метеорної частинки ($11 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1} < V_\infty < 71 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$) та зенітної відстані радіанта ($10^\circ < Z_R < 70^\circ$). Метеорні тіла з мінімальними швидкостями розташовуються ближче до верхньої межі, а з максимальними швидкостями — до нижньої. На обох діаграмах переважна частина точок розташована в однакових інтервалах меж, але добре помітним є систематичний зсув значень емпіричних мас частинок відносно значень фотометричних мас.

Рис. 3 демонструє залежність відношення m_{emp} / m_{ph} від позаатмосферної швидкості (V_∞) за даними різних каталогів. У діапазоні швидкостей $V_\infty > 25 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ у каталозі АВСМП відношення m_{emp} / m_{ph} близьке до 1; для репрезентативного каталогу [17] $m_{emp} / m_{ph} \approx 2$; для каталогу MSSWG $m_{emp} / m_{ph} \approx 0.5$. У діапазоні швидкостей метеороїдів $V_\infty < 25 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ маси m_{emp} і m_{ph} можуть відрізнитись на порядок. Суттєва різниця між каталогами у значеннях фотометричних мас, можливо, пов'язана з різними моделями вибору значення коефіцієнта τ ефективного випромінювання. Цей результат є важливим під час порівняння різних баз даних спостережень ме-

теорів, або наприклад, для моделювання кривих блиску метеорів з врахуванням хімічного складу, визначеного з метеорних спектрів.

Метеорні спектри. Для 12 досліджуваних у роботі метеорів отримано спектри (табл. 5). Однак для деяких з них спектри були виключені з ана-

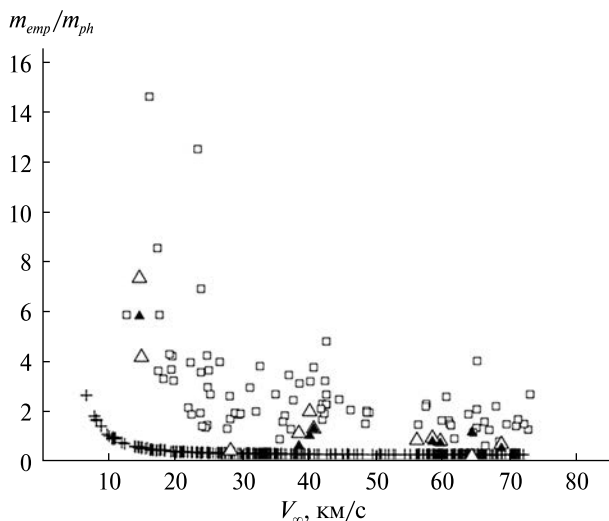


Рис. 3. Залежність відношення m_{emp}/m_{ph} емпіричної і фотометричної мас від позаатмосферної швидкості V_∞ : темні трикутники — за даними АВСМП-Харків, світлі трикутники — за даними АВСМП-Чугуїв, світлі квадратики — каталог [17], хрестики — каталог MSSWG [11]

Таблиця 5. Хімічний склад метеорних тіл

№	Номер спектру у базі АВСМП	Якість спектру	T_{ef} , К	Mg I-2, %	Fe I-15, %	Na I-1, %	Тип спектру
1	0098	Дуже слабкий	—	—	—	—	—
2	0099	!	6337	41	23	36	Нормальні метеороїди
3	0104	!	6406	44	19	37	Метеороїди, бідні на Fe
4	0163	!	5971	37	32	31	Нормальні метеороїди
5	0181		6525	38	34	28	Нормальні метеороїди
6	0186		7123	54	15	31	Метеороїди, бідні на Fe
7	0220		6380	52	34	13	Метеороїди, бідні на Na
8	0286		5000	46	17	37	Метеороїди, бідні на Fe
9	0287	!	5594	44	23	32	Нормальні метеороїди
10	0299	!	6777	46	21	33	Нормальні метеороїди
11	0312	Дуже слабкий	—	—	—	—	—
12	0399	Вздовж лінії дисперсії	—	—	—	—	—

Примітка: T_{ef} — ефективна температура метеорної плазми у максимумі блиску метеора, знаком «!» позначено яскраві спектри (зі значним рівнем сигнал/шум).

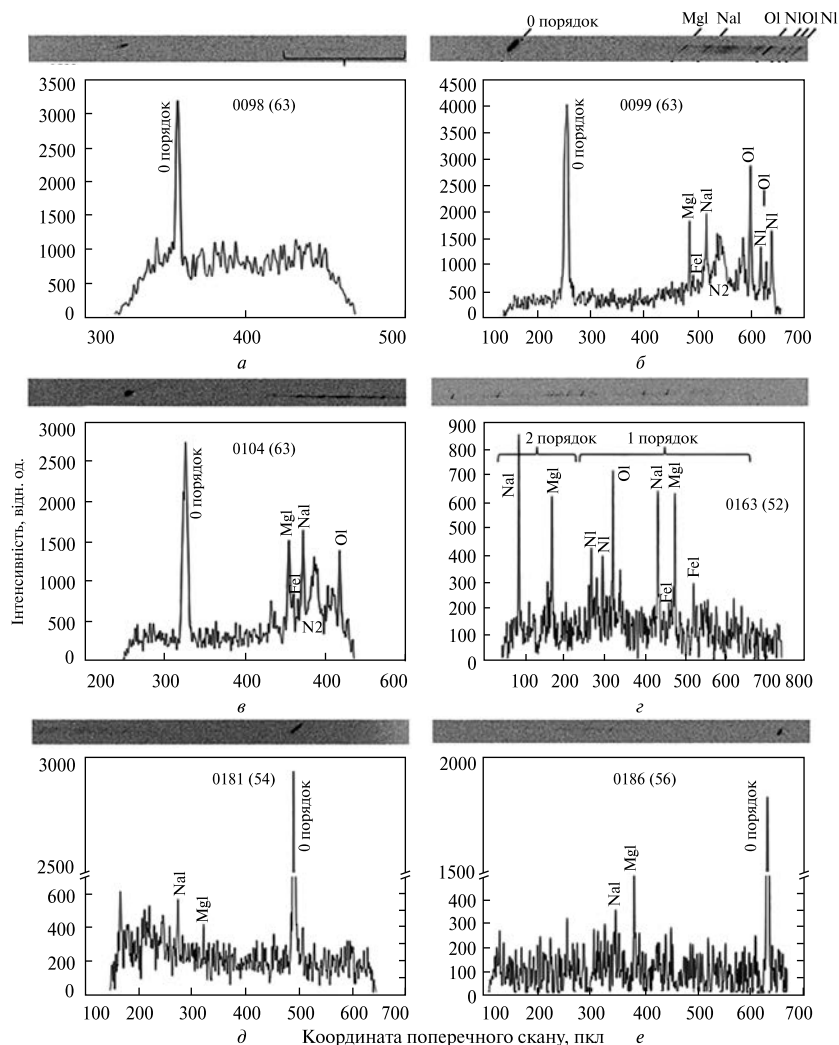


Рис. 4. Інтегральні поперечні скани фрагментів відео з метеорними спектрами у максимумі яскравості. Спектри показано з інверсією яскравості. Викид у яскравості відповідає нульовому порядку спектру. Вказано положення деяких найяскравіших ліній хімічних елементів у складі метеорного тіла. Дужками на зображеннях слабких спектрів показано їхні приблизні положення. Номери метеорів у базі даних спостережень АВСМП (у дужках — номер кадру відео зі спектром): *a* — 0098 (63), *б* — 0099 (65), *в* — 0104 (63), *г* — 0163 (52), *д* — 0181 (54), *е* — 0186 (56)

лізу через низьку якість зображення. Це метеорні спектри під номером 1, 11 і 12 у табл. 5. Спектри з низьким рівнем сигнал/шум потребують окремого вивчення та розробки методів виділення корисного сигналу з фону шумів. Знаком оклику «!» у таблиці позначені спектри зі значним рівнем сигнал/шум і які мають візуально чітко видимі спектральні лінії, що дає можливість впевнено провести позиційну прив'язку за довжинами хвиль в усьому отриманому спектрі ($\lambda\lambda$ 350...900 нм).

На рис. 4 представлено зображення фрагментів відео з метеорними спектрами у максимумі яскравості метеорів та їхні інтегральні поперечні скани. Для зручності сприйняття зображення спектрів показано з інверсією яскравості. Більш детально процедуру обробки метеорних спектрів описано у роботі [4]. Зазначимо тільки, що метеори переміщуються в полі зору спектральної камери під різними кутами до лінії дисперсії дифракційної ґратки, тому ми отримуємо спек-

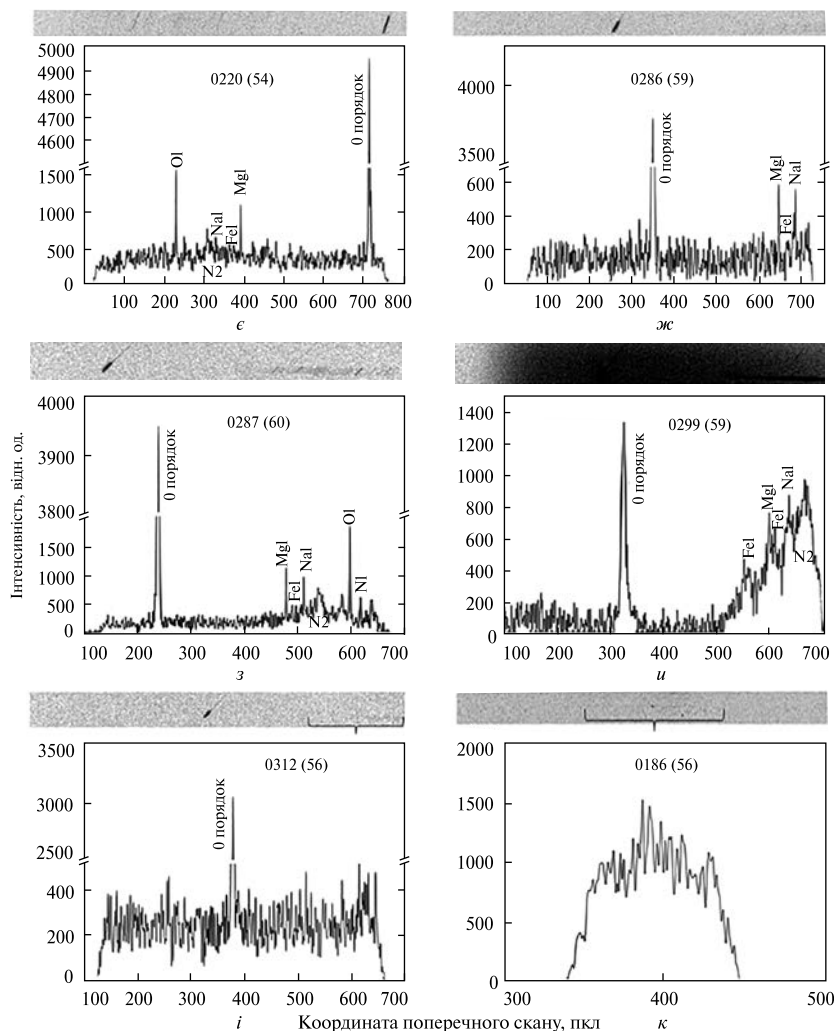


Рис. 4 (продовження): *ε* — 0220 (54), *жс* — 0286 (59), *з* — 0287 (60), *и* — 0299 (59), *і* — 0312 (56), *к* — 0399 (65)

три, у яких спектральні лінії нахилені під деякими кутами до осі абсцис в системі координат поля кадру. Для отримання дискретного поперечного скану оцифровується частина зображення зі спектром, повернутого на кут поздовжнього переміщення зображення метеора у полі кадру. Далі створюється інтегральний поперечний скан шляхом підсумовування значень яскравостей пікселів у кожному стовпці вибраної частини зображення. Отриманий скан апроксимується кубічним сплайном і гауссіаною для подальшого отримання спектрограм та наступної їхньої обробки (прив'язка за довжинами хвиль, про-

цедури корекції за фотометричні і геометричні спотворення, абсолютне калібрування спектрограми тощо).

Переважає більшість спектрів мають нульовий порядок зображення метеора, який проявляється у вигляді окремого викиду яскравості на поперечних сканах. Спектр метеора 0163 за базою даних спостережень АВСМП (табл. 5) містить спектр першого і частково другого порядку (рис. 4, *з*). На рис. 4, *а*, *і*, *к*, під зображенням спектрів дужкою вказано приблизні положення слабких спектральних ліній 1-го порядку. На зображенні спектра та інтегральному поперечному

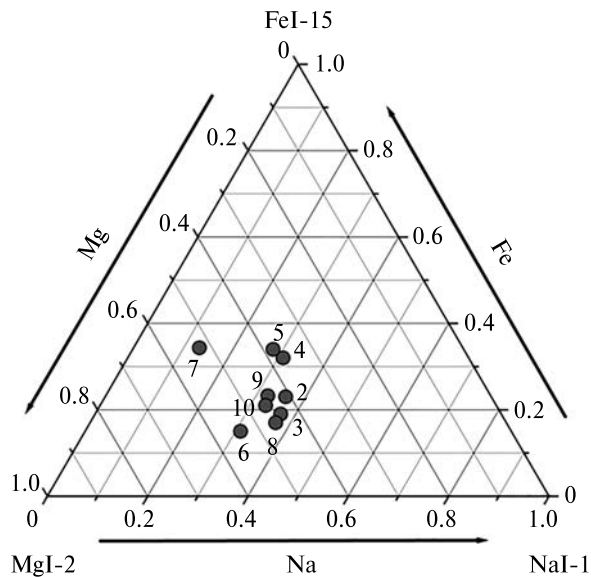


Рис. 5. Потрійний графік для мультиплетів Na I-1, Mg I-2 і Fe I-15 у дев'яти досліджуваних метеорних спектрах. Нумерація точок відповідає нумерації у табл. 5

скані (рис. 4, б) вказано положення деяких найяскравіших ліній хімічних елементів у складі метеорного тіла та земної атмосфери: Mg I, Na I, Fe I, N I, O I, смуги молекулярного азоту N₂.

Після отримання сканованого зображення метеорного спектру та його калібрування здійснюється детальна ідентифікація спектральних ліній з урахуванням різноманітних геометричних і фотометричних спотворень, виконується пошук нових емісійних ліній, визначаються їхні абсолютні інтенсивності, розраховуються фізичні параметри метеорних тіл і т. д. [4].

Визначення хімічного складу метеороїдів. Для якісного та кількісного аналізу хімічного складу метеороїда за його метеорною спектрограмою ми використовуємо синтетичний спектр, який розраховується за формулою:

$$I_{nr} = \frac{1}{4\pi} \frac{hc}{\lambda Z} N_0 g_n A_{nr} \exp\left(-\frac{E_n}{kT_{\text{еф}}}\right), \quad (3)$$

де I_{nr} — інтенсивність спектральної лінії, 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, N_0 — загальна кількість атомів

цього елемента у випромінюючому 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 Базис даних NIST ASD [9]. Припускається, що у метеорній плазмі виконуються умови локальної термодинамічної рівноваги. У такому випадку ефективна й електронна температури $T_{\text{еф}}$ і T_e будуть рівні за значенням, а отже, з формули (3) можна визначити загальну кількість атомів хімічного елемента у об'ємі, що випромінює. Змінюючи інтенсивність різних атомних синтетичних спектральних ліній метеора, атмосферного кисню й азоту, можна розділити на окремі спектральні лінії складні метеорні спектри з емісіями, що є сукупністю ліній різних хімічних елементів.

Ефективну температуру метеорної плазми ми оцінюємо методом спектральної пірометрії, що впливає з рівняння Планка, записаного через випромінювальну здатність:

$$\ln(\lambda^5 I_s) - \ln(\varepsilon C_1) = \frac{C_2}{\lambda T_{\text{еф}}}, \quad (4)$$

де I_s (Вт·см⁻²·мкм) — спектральна інтенсивність випромінювання на довжині хвилі l (мкм), $C_1 = 37418$ Вт·мкм⁴·м⁻², $C_2 = 14388$ мкм·К, $T_{\text{еф}}$ (К) — температура, що визначається, ε (Вт·м⁻²·м⁻¹) — випромінювальна здатність.

Температуру обчислюють за тими спектральними діапазонами, де спектри подібні до планківського спектру, і їх можна апроксимувати функцією Віна (короткохвильова частина функції Планка). У цьому випадку, якщо прийняти $\varepsilon = \text{const}$, спектрограма метеора будується у координатах Віна. Кожен спектр представляється в координатній площині (x, y) , де $x = \ln(\lambda^5 I)$ і $y = C_2/\lambda$. Нахил спектрограми у таких координатах прямо дає значення ефективної температури метеорної плазми. Ділянки спектрограми із сильно зашумленими значеннями сигналу або спотворені спектральними смугами першої позитивної системи молекулярного азоту (N₂), вилучаються з розрахунків. Визначені таким спо-

собом ефективні температури у максимумі блиску для різних метеорів приведено у табл. 5.

Знайдена загальна кількість атомів певного хімічного елемента у випромінюючому об'ємі дає можливість розрахувати відносні значення концентрацій Fe, Mg, Na, Ca, Si тощо, а отже, визначити, до якого загального класу (залізний, залізо-силікатний чи силікатний) належить метеороїд. Але потрібно 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 по-

хибки абсолютних значень концентрацій елементів можуть досягати десятків відсотків (в окремих випадках понад 30...50 відсотків). Тому питання безеталонного методу визначення хімічного складу метеорних тіл ще потребує подальшого вирішення.

Як альтернатива, для кількісного аналізу на практиці знаходять значення відносних інтенсивностей ліній Fe I-15 ($\lambda\lambda$ 527...545 нм), Mg I-2 (λ 516.7 нм), Na I-1 (λ 588.9 нм) [5, 10, 13, 17]. Тут цифрами через дефіс вказано номери мультиплетів спектральних ліній, а в дужках вказані їхні довжини хвиль. Це також відображає

Таблиця 6. Умовна класифікація метеорних тіл за типами їхніх спектрів відповідно до роботи [5]

Класифікація за типом спектра	Опис
Залізні метеороїди (Iron meteoroids)	У спектрах немає чітких ліній, але спостерігаються дві смуги з довжинами хвиль $\lambda\lambda$ 420...450 і 510...550 нм, утворені нерозділеними лініями мультиплетів Fe. Лінія Na відсутня. Смуга $\lambda\lambda$ 420...450 нм утворена нерозділеними лініями мультиплетів Fe 41, 42 і 2 без внеску лінії Ca (λ 422.6 нм). Смуга $\lambda\lambda$ 510...550 нм частково пояснюється лініями Fe (мультиплет 15), але є також значна емісія біля основної лінії Mg (λ 518 нм), хоча вона дещо ширша, ніж очікується для Mg. Ця емісія здебільшого пов'язана зі слабкою лінією Fe (мультиплет 1), але можливий і невеликий внесок Mg, а в обох смугах навіть ймовірний. Однак у будь-якому випадку лінія Mg набагато слабкіша, ніж у звичайних спектрах. Враховуючи, що більшу частину випромінювання дають атоми Fe, ці метеороїди називають залізними
Безнатрієві метеороїди (Na-free meteoroids)	Це метеороїди, що не містять ліній Na у своїх спектрах, але не класифікуються як залізні (Iron meteoroids). Для цього класу співвідношення Fe/Mg змінюється в широких межах
Метеороїди багаті на Na (Na-rich meteoroids)	У спектрах метеорів цього класу лінії Na інтенсивні, а у співвідношенні Na/Mg переважає лінія Na. Співвідношення Na/Fe вище, ніж очікується для хондритів. Лінії Mg і Fe наявні, але вони слабкі, особливо лінії Mg
Основні метеороїди (Mainstream meteoroids)	Метеороїди, які займають середню частину потрібної діаграми Mg — Na — Fe, називаються основними метеороїдами, оскільки вони становлять більшість метеороїдів, і їхні спектри ближчі до очікуваних спектрів хондритів. Основні метеороїди поділяються на чотири підкласи (вказано далі)
Нормальні метеороїди (Normal meteoroids)	Нормальні метеороїди визначаються як ті, що лежать поблизу очікуваного положення для хондритних тіл на діаграмі Mg — Na — Fe або з дещо нижчою інтенсивністю Fe. Межа між нормальними та метеороїдами з незначним вмістом Fe є дещо довільною. Межа обирається так, щоб більшість метеороїдів потоку Леонід класифікувалися як нормальні
Метеороїди, бідні на Na (Na-poor meteoroids)	Метеороїди, бідні на Na, мають значно слабшу лінію Na у спектрах, ніж очікувалося для даної швидкості, але все ще надійно помітну на відміну від метеороїдів без Na
Метеороїди з підвищеним вмістом Na (Enhanced-Na meteoroids)	Метеороїди з підвищеним вмістом Na визначаються як метеороїди, у спектрах яких лінія Na значно яскравіша, ніж очікувалося для даної швидкості, але не така домінуюча, як для метеороїдів, багатих на Na
Метеороїди бідні на Fe (Fe-poor meteoroids)	Метеороїди бідні на Fe визначаються як метеороїди з очікуваним співвідношенням Na/Mg, але з лініями Fe занадто слабкими, щоб їх можна було класифікувати як нормальні

інформацію про класифікацію метеороїда. До табл. 5 внесено відносні значення інтенсивностей вказаних спектральних ліній. На рис. 5 представлено потрібний графік для мультиплетів Na I-1, Mg I-2 і Fe I-15 у дев'яти досліджуваних нами метеорних спектрах. За цією діаграмою ми визначили тип метеорних спектрів (табл. 5) згідно з класифікацією у роботах [5, 10, 13, 17], де автори пропонують умовно класифікувати хімічний склад метеорних тіл за типами їхніх спектрів (табл. 6): залізні метеороїди (Irons meteoroids); безнатрієві метеороїди (Na-free meteoroids); метеороїди, багаті на натрій (Na-rich meteoroids); нормальні метеороїди (Normal meteoroids); бідні натрієм метеороїди (Na-poor meteoroids); метеороїди з підвищеним вмістом натрію (Enhanced-Na meteoroids); бідні на залізо метеороїди (Fe-poor meteoroids).

З табл. 5 та діаграми на рис. 5 видно, що серед досліджених метеорних тіл є відносно бідні на залізо (метеорні тіла № 3, 6, 8) або натрій (спорадичне метеорне тіло № 7) у своєму хімічному складі. Інші спостережені метеороїди належать до нормального спектрального типу.

ВИСНОВКИ

У роботі представлено результати обробки і аналізу базисних та спектральних спостережень метеорів, виконаних у 2019—2020 рр. із використанням автоматизованого відео-спектрального метеорного патруля (АВСМП) НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Для вибраних 12 метеорів представлено результати вимірювань та розрахунків координат метеорних радіантів, параметри атмосферних траєкторій метеорних тіл, геліоцентричні орбітальні параметри спостережених метеороїдів на епоху (J2000). Ці параметри вказують на те, що спостережені метеороїди належать відомим метеорним потокам та, ймовірно, їхнім батьківським кометам: Персеїди (комета 109P/Swift — Tuttle), Леоніди (55P/Tempel —

Tuttle), Південні Тауриди (2P/Encke). Деякі метеорні тіла не ототоженені з відомими метеорними потоками, тому є спорадичними.

З використанням емпіричної формули та методом інтегрування кривої зміни блиску метеора визначено позаатмосферні маси метеороїдів. Маси метеороїдів, розраховані зі спостережень у Харкові, хоч і мають деякий розкид значень, але загалом узгоджуються зі спостереженнями інших дослідників в інтервалі абсолютних значень яскравості метеорів $-2^m \dots +1.5^m$.

Виконано аналіз ототожнених емісійних ліній, виявлених у метеорних спектрах. Для цього застосовувалось програмне забезпечення AVSMP_Pro v1, розроблене авторами цієї статті для обробки метеорних спектрів [4]. Проведено якісний і кількісний аналіз хімічного складу метеорних тіл. Під час кількісного аналізу знаходились значення відносних інтенсивностей ліній Fe I-15 ($\lambda\lambda$ 527...545 нм), Mg I-2 (λ 516.7 нм), Na I-1 (λ 588.9 нм). Це дало можливість класифікувати досліджувані в роботі метеороїди за типом їхніх метеорних спектрів. Виявлено, що серед досліджених метеорних тіл є відносно бідні на залізо або натрій у своєму хімічному складі.

Робота у НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна частково підтримувалась за рахунок видатків держбюджетної теми № БФ/32-2023 (121) в ХНУ імені В. Н. Каразіна відповідно до Наказу Міністерства освіти і науки України від 23.02.2023 № 195 «Про затвердження переліку закладів вищої освіти, яким надаватимуться бюджетні кошти для підтримки пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами проведеної державної атестації, з відповідними обсягами фінансування на 2023 рік»; робота у Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка виконувалась за рахунок часткового фінансування в рамках виконання держбюджетної теми № 22БФ023-02.

ЛІТЕРАТУРА

1. Голубаєв О. В. Кінематичні та фізичні характеристики метеорних тіл з радіантами поблизу Сонця за даними наземних телевізійних спостережень: дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Київ, 2017.
2. Голубаєв О. В., Горбаньов Ю. М., Шульга О. В., Андреев О. А., Бушуєв Ф. І., Відьмаченко А. П., Грудинін Б. О., Жилияєв Б. Ю., Калюжний М. П., Козак П. М., Куліченко М. О., Малиновський Є. В., Мозгова А. М., Савчук С. Г., Стеклов О. Ф., Сумарук Ю. П., Янків-Вітковська Л. М. Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28** (4). С. 39—70. doi: 10.15407/knit2022.04.039
3. Кручиненко В. Г. *Математико-фізичний аналіз метеорного явища*. Київ: Наук. думка, 2012. С. 274—292.
4. Мозгова А., Голубаєв О. Метеорна база даних за спостереженнями у 2019—2021 роках із використанням автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Сер. Астрономія*. 2022. **2** (66). С. 26—35. doi: 10.17721/BTSNUA.2022.66.26-35
5. Borovička J., Koten P., Spurný P., Boček J., Štork R. A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids. *Icarus*. 2005. **174** (1). P. 15—30. doi: 10.1016/j.icarus.2004.09.011
6. Campbell-Brown M. D., Koschny D. Model of the ablation of faint meteors. *Astron. and Astrophys.* 2004. **418**. P. 751—758. doi: 10.1051/0004-6361:20041001-1
7. Kasuga T., Yamamoto T., Kimura H., Watanabe J. Thermal desorption of Na in meteoroids. Dependence on perihelion distance of meteor showers. *Astron. and Astrophys.* 2006. **453** (2). P. L17—L20. doi: 10.1051/0004-6361:20065330
8. Kozak P. M. Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classic heights. *Kinematika i fizika nebesnyh tel.* 2019. **35** (6). P. 62—79. doi: 10.15407/kfnt2019.06.062
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8). (Online). <https://physics.nist.gov/asd> (2020, November 15). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
10. Matlovič P., Tóth J., Rudawska R., Kornoš L., Písarčíková A. Spectral and orbital survey of medium-sized meteoroids. *Astron. and Astrophys.* 2019. **629**. A71. doi: 10.1051/0004-6361/201936093
11. MSSWG. URL: <http://www.imo.net/files/msswg/msswg.txt> (Last accessed: 26.06.2023).
12. MSSWG info IMO. URL: <https://www.imo.net/resources/databases/> (Last accessed: 26.06.2023).
13. Sekiguchi Takashi. Results of spectral observations of meteor showers and sporadic meteors from October 2018 until May 2020. *eMeteor News*. 2020. **5**(5). P. 300—313. <https://www.meteornews.net>.
14. Shigeno Y., Shioi H., Tanaka S. Double-station TV meteor observations in 1996. *WGN. J. Int. Meteor Organization*. 1996. P. 161—165.
15. SonotaCo. UFO Capture is motion capture software. URL: http://sonotaco.com/e_index.html (Last accessed: 13.11.2023).
16. Spurný P. Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993—1996. *Planetary and Space Sci.* 1997. **45** (5). P. 541—555. doi: 10.1016/S0032-0633(97)00006-8
17. Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R. Catalogue of representative meteor spectra. *Astron. and Astrophys.* 2015. **580**, A67. P. 31. doi: 10.1051/0004-6361/201425047
18. Voloshchuk Yu. I., Kashcheev B. L., Kruchinenko V. G. *Meteors and meteoric substance*. Naukova Dumka, 1989.

REFERENCES

1. Golubaev A. V. (2017). Kinematic and physical characteristics of meteoroids with radiants near the Sun according to terrestrial television observations. Ph.D. Kyiv [in Ukrainian].
2. Golubaev A. V., Gorbaney 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., Malynovskiy Ye. V., Mozgova A. M., Savchuk S. G., Steklov A. F., Sumaruk Yu. P., Yankiv-Vitkovska L. M. (2022). Creation of the Ukrainian meteor observation network: instruments, methods for processing, observatin possibilities. *Space Sci. and Technol.*, **28** (4), 39—70. doi: 10.15407/knit2022.04.039 [in Ukrainian].
3. Kruchynenko V. G. (2012). *Mathematical and physical analysis of the meteor phenomenon*: [monography]. Kyiv: Naukova dumka, 274—292 [in Ukrainian].
4. Mozgova A., Golubaev A. (2022). The meteor database of observations in 2019—2021 with the automatical video and spectral meteor patrol of V. N. Karazin Kharkiv National University. *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univ. Kyiv. Astronomy*, **2** (66), 26—35. doi: 10.17721/BTSNUA.2022.66.26-35 [in Ukrainian].
5. Borovička J., Koten P., Spurný P., Boček J., Štork R. (2005). A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids. *Icarus*, **174** (1), 15—30. doi: 10.1016/j.icarus.2004.09.011
6. Campbell-Brown M. D., Koschny D. (2004). Model of the ablation of faint meteors. *Astron. and Astrophys.*, **418**, 751—758. doi: 10.1051/0004-6361:20041001-1
7. Kasuga T., Yamamoto T., Kimura H., Watanabe J. (2006). Thermal desorption of Na in meteoroids. Dependence on perihelion distance of meteor showers. *Astron. and Astrophys.*, **453** (2), L17—L20. doi: 10.1051/0004-6361:20065330

8. Kozak P. M. (2019). Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classic heights. *Kinematika i fizika nebesnyh tel*, **35** (6), 62–79. doi:10.15407/kfnt2019.06.062
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team. (2020). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8). Online: <https://physics.nist.gov/asd> (2020, November 15). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
10. Matlovič P., Tóth J., Rudawska R., Kornoš L., Písarčíková A. (2019). Spectral and orbital survey of medium-sized meteoroids. *Astron. and Astrophys.*, **629**, A71. doi:10.1051/0004-6361/201936093
11. MSSWG. URL: <http://www.imo.net/files/msswg/msswg.txt> (Last accessed: 26.06.2023).
12. MSSWG info IMO. URL; <https://www.imo.net/resources/databases/> (Last accessed: 26.06.2023).
13. Sekiguchi Takashi. (2020). Results of spectral observations of meteor showers and sporadic meteors from October 2018 until May 2020. *eMeteor News*, **5** (5), 300–313. <https://www.meteornews.net>.
14. Shigeno Y., Shioi H., Tanaka S. (1996). Double-station TV meteor observations in 1996. *WGN. J. Int. Meteor Organization*, 161–165.
15. SonotaCo. UFO Capture is motion capture software. URL: http://sonotaco.com/e_index.html (Last accessed: 13.11.2023).
16. Spurný P. (1997). Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993–1996. *Planetary and Space Science*, **45** (5), 541–555. doi: 10.1016/S0032-0633(97)00006-8
17. Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R. (2015). Catalogue of representative meteor spectra. *Astron. and Astrophys.*, **580**, A67, 31. doi: 10.1051/0004-6361/201425047
18. Voloshchuk Yu. I., Kashcheev B. L., Kruchinenko V. G. (1989). *Meteors and meteoric substance*. Naukova Dumka.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2023

Після доопрацювання 20.04.2024

Прийнято до друку 08.05.2024

Received 22.11.2023

Revised 20.04.2024

Accepted 08.05.2024

A. V. Golubaev¹, Head of Chuguev Observ. Station, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: alexandr_sky1@ukr.net

A. M. Mozgova², Junior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: alenamozgova@ukr.net

¹ Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

² Astronomical Observatory, Kyiv National Taras Shevchenko University

3 Observatorna Str., Kyiv, 04053 Ukraine

KINEMATIC PARAMETERS, PHYSICAL CHARACTERISTICS, AND CHEMICAL COMPOSITION OF SELECTED METEOR BODIES

Background. Meteoroids can reach the Earth and penetrate its atmosphere creating meteor phenomena. Kinematic parameters, physical characteristics, and chemical compositions of the observed meteor bodies provide information about the properties of their parent bodies — comets and asteroids. On the other hand, these parameters can reflect the physical conditions of meteoroids staying in different parts of the Solar System and beyond.

Methods. The meteor data analyzed in this work were obtained from observations using the automatical video and spectral meteor patrol (AVSMP) of the Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University. The methods of meteor astronomy and spectroscopy make it possible to determine the kinematic parameters, physical properties, and chemical composition of the meteoroids that we studied.

Results. The paper presents the research results of meteors brighter than 0^m that were recorded by the multi-stations method. These meteors also have spectral observations. For the selected 12 meteors, we obtained the coordinates of meteor radiants on the celestial sphere, the parameters of the atmospheric trajectories of meteor bodies, and the heliocentric orbital parameters of the observed meteoroids for the epoch (J2000). The extra-atmospheric masses of meteoroids were determined from photometric data. The identified emission lines detected in meteor spectra were analyzed. The software developed by the authors of this paper for meteor spectra processing was used. Qualitative and quantitative analyses of the chemical composition of meteor bodies were carried out. During the quantitative analysis, the values of the relative intensities of the Fe I-15, Mg I-2, and Na I-1 lines were determined.

Conclusions. Kinematic parameters and elements of heliocentric orbits presented in this work indicate that the observed meteor bodies belong to meteor showers and their comets, such as Perseids, Leonids, and Southern Taurids. Some meteor bodies are sporadic. The calculated masses of meteoroids have some scatter of values, but they are generally consistent with observations of other authors in the range of absolute values of the meteor brightness $-2^m \dots +1.5^m$. It was found that some of the studied meteor bodies are Fe-poor or Na-poor in their chemical composition.

Keywords: meteor, meteoroid, heliocentric orbit, meteoroid mass, spectrum, spectral lines, chemical composition.