

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Науково-дослідний інститут астрономії

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Голубаєв Олександр Володимирович

УДК 523.62 + 523.682 + 523.683 + 520.84

ДИСЕРТАЦІЯ

**Кінематичні та фізичні характеристики метеорних тіл з радіантами
поблизу Сонця за даними наземних телевізійних спостережень**

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

104 – Фізика та астрономія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник

кандидат фізико-математичних наук,
Горбаньов Юрій Михайлович,
старший науковий співробітник
НДІ "Астрономічна обсерваторія"
ОНУ ім. І.І. Мечникова

Харків - 2017

АНОТАЦІЯ

Голубасєв О.В. Кінематичні та фізичні характеристики метеорних тіл з радіантами поблизу Сонця за даними наземних телевізійних спостережень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 “Дистанційні аерокосмічні дослідження” (104 – Фізика та астрономія). – Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Міністерство освіти і науки України, Харків; Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню сукупності наукових проблем метеорної астрономії, пов'язаних з удосконаленням методів спостережень, обробки спостережного матеріалу і аналізу отриманих результатів для вивчення кінематичних і фізичних властивостей метеороїдів, які при зіткненні із Землею мають на небесній сфері радіанти поблизу Сонця.

Основний результат роботи полягає в тому, що розроблено методіку та створено відповідне програмне забезпечення для розрахунку основних кінематичних параметрів метеорів за спостереженнями з двох віддалених пунктів. В якості спеціального випадку – спостереження болідів в денний час доби, створена і апробована методика для обчислення кінематичних параметрів таких тіл. Метод застосований для обчислення кінематичних параметрів Челябінського боліда 15 лютого 2013 року. Створено базу даних відеоспостережень метеорів в Одесі (починаючи з 2003 р.). Каталог містить більше 11000 відеофайлів телескопічних (до $+10^m$) метеорів. У розподілі метеорних частинок за перигелійними відстанями спостерігається різке зменшення чисельності метеорних тіл з $q < 0.08$ а.о., де завершується утворення мікроскопічного пилу в результаті сублимації кометних ядер при наближенні їх до Сонця. У розподілі за масами метеорних тіл виявлено відносне зменшення значень мас для близькосонячних пилових частинок, які

зафіксовані на післяперигелійній частині орбіти. Робиться висновок про існування зони на геліоцентричній відстані ~ 0.1 а.о., з якої при наближенні до Сонця починається істотне випаровування речовини метеороїдів. Виявлено нові групи і підгрупи метеорних радіантів, пов'язаних з частинками навколосонячного спорадичного пилового фону. Кожна з груп радіантів належать кометним сімействам: радіанти з елонгацією від Сонця на небесній сфері близько 30° і 155° - сімейству комет Марсдена і Крахта, а радіанти з елонгацією від Сонця на небесній сфері близько 50° і 135° - сімейству комет Крейца.

Практична цінність полягає в тому, що представлена в роботі методика спостережень і обробки спостережного матеріалу може бути застосована для будь-якого класу метеорних патрулів: рухливих, автоматичних і стаціонарних (нерухомих), оснащених об'єктивами будь-яких типів і характеристиками (від короткофокусних об'єктивів до телескопічних оптичних систем). Одеська база даних безперервних телескопічних відеоспостережень метеорів, яка створена у НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова (більше 11000 відеофайлів за 2003 – 2017 рр. з метеорами до $+10^m$) є в даний момент унікальною та становить інтерес для дослідження метеорів, які раніше були недоступні в оптичному діапазоні. Викладені в роботі результати досліджень доповнюють фундаментальні знання про термічний вплив Сонця на фізико-хімічні властивості тіл Сонячної системи. Ефект термічної десорбції речовини метеороїдів в близькосонячному просторі необхідно враховувати при вивченні еволюції їх кінематичних і фізико-хімічних параметрів.

Ключові слова: метеор, метеороїд, метеорна орбіта, комета, термічна десорбція, сублимація.

ABSTRACT

Golubaev A.V. Kinematic and physical characteristics of meteoroids with radiants near the Sun according to terrestrial television observations. - Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 05.07.12 - Remote Aerospace Researches (104 – Physics and astronomy). - Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv; National Aviation University, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to solving a complex of scientific problems of meteor astronomy which related with the improvement of observation methods, observation material processing and analysis of the results for studying kinematics and physical properties of meteoroids which have radiants on the celestial sphere near the Sun during the collision with the Earth.

The main result is the method improving and created appropriate software for calculating basic kinematic parameters of meteors with observations from two distant points. The method was created and was tested for computing basic kinematic parameters for a special case - bolides phenomena observation during the day. The method was used for calculating basic kinematic parameters of Chelyabinsk bolide phenomenon on February 15, 2013. A database of meteors video observations in Odessa was created (since 2003). It contains more than 11000 videos of meteor phenomena. The distribution of meteor particles with perihelion distances shows a sharp decrease of the meteoroid number at $q < 0.08$ AU, where the formation of microscopic dust completes due to sublimation of cometary nuclei at the approach to the Sun. The meteoroid distribution of masses was found a relative decrease of weight for dust particles near Sun on after perihelion part of their orbit. It is concluded that there is a region at the heliocentric distance at ~ 0.1 AU, where a significant evaporation substance of meteoroids begins with the approaching to the Sun. It was found new groups and subgroups of meteor radiants which associated with sporadic dust particles of the near Sun sporadic background. Detected new groups and subgroups of meteor radiants were associated with sporadic dust particles of around Sun background. Each group of radiants belongs to comet families: radiants with elongation about 30° and 155°

from the Sun belong to Marsden and Kraht comet families and radiants with elongation about 50° and 135° from the Sun belong to Kreutz family of comets.

The practical value of this work is that the observation and processing method represented in this work can be applied for any class of meteor patrols: mobile, automatic and permanent (fixed) equipped with lenses of all types and characteristics (from short focal lenses to telescopic optical systems). The research results outlined in this work complement the basic knowledge of the solar thermal impact on the physical and chemical properties of the Solar system bodies. It is necessary to consider the effect of thermal desorption of meteoroid matter near the Sun during studying of the evolution of their kinematic and physical and chemical parameters.

Keywords: meteor, meteoroid, meteor orbits, thermal desorption, sublimation, Sun-grazing comets

Список публікацій здобувача

За темою дисертації опубліковано: 1 публікація в монографічному збірнику; 6 статей у наукових фахових виданнях; 6 статей – у збірниках праць наукових конференцій; 15 – у вигляді тез наукових доповідей. Серед надрукованих робіт, достатньо повно відображають зміст дисертації наступні роботи:

1. Горбаньов Ю.М., Шестопалов В.О., Сарест Л.О., Голубаєв О.В. Телевізійне метеорне патрулювання на о. Зміїний // Острів Зміїний, 1 том (Абіотичні характеристики), 6 розділ. Монографія. Одеса, “Астропринт”. – 2008.
2. Gorbanev Yu.M., **Golubaev A.V.**, Zhukov V.V., Knyaz'kova E.F., Kimakovskii S.R., Kimakovskaya I.I., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Stogneeva I.A., Shestopalov V.A. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors // Sol. Syst. Res. – 2006. – V. 40. – Iss. 5. – P. 412 - 426.

3. *Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V., Zhukov V.V., Kimakovskaya I.I., Kimakovsky S.R., Knyazkova E.F., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Stogneeva I.A., Shestopalov V.A.* Techniques for positional measurements of telescopic meteor TV images // *Sol. Syst. Res.* – 2008. – V. 42. – Iss. 1. – P. 35 – 50.
4. **Golubaev A.V.** Main Parameters of Meteoroid Motion during the Fall of the Chelyabinsk Meteorite Shower on February 15, 2013 // *Sol. Syst. Res.* – 2015. – V. 49. – №. 3. – P. 147 - 158.
5. **Golubaev A.V.** Sungrazing Dust Particles against the Sporadic Meteor Background // *Sol. Syst. Res.* – 2015. – V. 49. – №. 4. – P. 226 — 236.
6. *Thuillot W., Bancelin D., Ivantsov A., Desmars J., Assafin M., Ettl S., Hestroffer D., Rocher P., Carry B., David P., Golubaev A.V., and 64 coauthors.* The astrometric Gaia-FUN-SSO observation campaign of 99942 Apophis // *Astronomy & Astrophysics.* – 2015. – V. 583. – id. A59. – 12 pp.
7. *Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V.* Definition of poles of the large circles of meteoric trajectories // *Odessa Astronomical Publications.* – 2009/2010. – V. 22. – P. 4 - 11.
8. *Горбанев Ю.М., Князькова Е.Ф., Шульга А.В., Куличенко Н.А., Козак П.Н., Мозговая А.М., Голубаев А.В.* “Украинская оптическая метеорная сеть” // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник “Радиотехника”. – 2016. – Вып. 185. – С. 5 - 8.

У роботах 1 – 3, 7 – 8 автор приймав участь у створенні та модернізації апаратури для спостережень метеорів, у розробці методики метеорних спостережень, методик позиційної й фотометричної обробки метеорних зображень, проводив систематичні спостереження метеорів. У роботі 4 автор розробив експрес-метод обчислення кінематичних параметрів болідних тіл, які спостерігалися у денний час доби. У роботі 5 виявив особливості прояву ефекту термічної десорбції речовини метеороїдів поблизу Сонця й дав теоретичне обґрунтування цих особливостей. У роботі 6 брав участь у

спостереженнях і обробці позиційних і фотометричних параметрів потенційно небезпечних для Землі астероїдів, зокрема астероїда 99942 Apophis (2004 MN₄). У роботах 4, 5 автор самостійно отримав результати, провів аналіз, виконав інтерпретацію отриманих даних та написав текст. Всі обчислення, що виконані в роботах 4, 5 були проведені за допомогою програмного забезпечення, розробленого особисто автором дисертації.

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І КОНСТАНТИ	11
ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРІВ	26
1.1. Методи й апаратура для оптичних спостережень метеорів.	26
1.2. Каталоги елементів орбіт і кінематичних параметрів метеорних тіл. ..	30
1.3. Каталоги спектральних спостережень метеорів.	33
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	35
РОЗДІЛ 2. АПАРАТУРА ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ МЕТЕОРІВ, МЕТОДИКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОБРОБКИ	37
2.1. Метеорний патруль НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова.	37
2.2. Спостережний матеріал.....	43
2.3. Метеорна база даних телескопічних метеорів. Первинна обробка спостережень.	44
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	47
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ЕЛЕМЕНТІВ ГЕЛІОЦЕНТРИЧНИХ ОРБІТ МЕТЕОРНИХ ТІЛ	49
3.1. Позичійні вимірювання зоряних зображень.	49
3.2. Позичійні вимірювання метеорних зображень.	52
3.3. Обчислення координат полюсів великих кіл метеорних траєкторій. ...	56
3.4. Обчислення кінематичних атмосферних параметрів метеорів.	58
3.5. Обчислення атмосферної швидкості метеорних тіл.	69
3.6. Обчислення елементів геліоцентричної орбіти метеорного тіла.	78
3.6.1. Виправлення швидкості за обертання Землі.	78
3.6.2. Виправлення швидкості за притягання Землі.	79
3.6.3. Виправлення координат радіанта за добову аберацію (обертання Землі).	79

3.6.4. виправлення координат радіанта за зенітне притягання Землі.	80
3.6.5. Координати виправленого радіанта з урахуванням поправок за добову аберацію й за зенітне притягання.	81
3.6.6. Обчислення елементів геліоцентричної орбіти метеороїда.....	81
3.7. Експрес-метод обчислення основних кінематичних параметрів болідних тіл, що спостерігаються у денний час доби.	87
3.7.1. Особливості спостережень Челябінського метеоритного дощу 15 лютого 2013 року.....	87
3.7.2. Методика вимірювання відеозображення.	91
3.7.3. Траєкторія Челябінського метеороїда в атмосфері Землі.	94
3.7.4. Визначення висоти польоту Челябінського метеороїда над земною поверхнею.	97
3.7.5. Зенітна відстань радіанта. Кут нахилу траєкторії Челябінського метеороїда.	100
3.7.6. Швидкість руху Челябінського метеороїда.....	101
3.7.7. Позаатмосферна швидкість Челябінського метеороїда.	103
3.7.8. Геліоцентричні елементи орбіти Челябінського болідного тіла. ..	104
3.7.9. Місце падіння на земну поверхню метеоритного фрагмента, спостережуваного на кінцевій стадії боліда.	108
3.8. Апробація методики обчислення кінематичних параметрів метеорних тіл за базисними спостереженнями в телевізійному режимі і результати.	111
3.9. Результати позиційних спостережень метеорів у серпні 2010 і 2011 роках у Крижанівці (Одеса) і на острові Зміїний.	114
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	115
РОЗДІЛ 4. ТЕРМІЧНА ДЕСОРБЦІЯ РЕЧОВИНИ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК ПОБЛИЗУ СОНЦЯ. АНАЛІЗ ДАНИХ ТА ЇХНЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ.....	117
4.1. Пилова речовина на геліоцентричних відстанях менше 0,1 а.о. від Сонця.....	117

4.1.1. Властивості метеороїдного фону поблизу Сонця.....	118
4.1.2. Близькосонячні комети і генетично пов'язані з ними метеороїдні потоки.....	119
4.2. Прояв ефекту теплового впливу Сонця на метеороїди в їхньому розподілі по перигелійних відстанях.....	122
4.3. Умови, необхідні для виявлення і спостереження з поверхні Землі близькосонячних метеорних тіл.....	129
4.4. Прояв ефекту термічного впливу Сонця в розподілі метеорних частинок по масах.....	134
4.5. Механізм термічної десорбції речовини метеороїдів.....	138
4.5.1. Залежність температури пилових частинок від геліоцентричної відстані.....	138
4.5.2. Хімічний склад речовини кометних пилових частинок. Температура і тиск пару при випаровуванні метеороїдної речовини. ...	141
4.5.3. Модель випаровування пилових частинок поблизу Сонця.....	146
4.5.4. Результати й аналіз модельних розрахунків по випаровуванню пилових частинок поблизу Сонця.....	149
4.6. Залежність хімічного складу метеорних тіл від перигелійної відстані їхніх геліоцентричних орбіт. Прояв ефекту термодесорбції в спектрах метеорів.....	152
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	157
ВИСНОВОК	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	164
ДОДАТОК	192

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І КОНСТАНТИ

Скорочення:

АЦП - аналого-цифровий перетворювач (англ. Analog-to-digital converter, ADC) - електронний пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал у дискретний код (цифровий сигнал);

КА - космічний апарат;

КМОН (англ. CMOS) - комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник / Complementary Metal-Oxide-Semiconductor;

ПЗЗ (англ. CCD) - прилад із зарядовим зв'язком / Charge-Coupled Device;

ІЧ - інфрачервоний діапазон довжин хвиль (~ 700 - 1000 нм);

ШСЗ - штучний супутник Землі;

ФЕП - фотоелектронний помножувач;

CCIR - скорочена назва Міжнародного консультативного комітету з радіомовлення. Цей комітет установив стандарт для чорно-білого телебачення. Цей же стандарт, доповнений сигналами кольору, став пізніше називатися стандартом PAL (Phase Alternate Line).;

CCTV (Closed Circuit Television) - Система телебачення замкнутого контуру;

D/F - відносний отвір об'єктива: відношення діаметра об'єктива (D) до його фокусної відстані (F);

UTC (Coordinated Universal Time) - всесвітній координований час;

WGS-84 (World Geodetic System, 1984) - всесвітня система геодезичних параметрів Землі 1984 року, у число яких входить система геоцентричних координат;

SNM (SonotaCo Network Members) - каталог мережі відеоспостережень метеорів SonotaCo у Японії (<http://sonotaco.jp/doc/SNM/>);

SPMN (SPanish Meteor Network, www.spmn.uji.es) - Іспанська метеорна мережа.

Елементи орбіт малих тіл Сонячної системи та їхні параметри:

$a.o.$ (англ. AU) – астрономічна одиниця: відстань від Землі до Сонця, порядку $1,5 \cdot 10^8$ км;

a – велика піввісь ($a.o.$);

e – ексцентриситет;

q – перигелій, найближча до Сонця точка орбіти небесного тіла; перигелійна відстань – відстань від Сонця до перигелію ($a.o.$);

Q (або q') – афелій, афелійна відстань, точка орбіти максимально віддалена від Сонця ($a.o.$);

i – нахил, кут між площиною орбіти й площиною екліптики (кут. градуси);

Ω – довгота висхідного вузла (кут. градуси);

ω – аргумент перигелію, (кут. градуси);

Константи:

$1 R_{\odot} = 0,0046524 a.e.$ – радіус Сонця виражений в $a.o.$;

$T_E = 23,934$ – період обертання Землі (години);

$K_G = 0.01720209895 (a.o.)^3 \cdot \text{добу}^{-2}$ – гравітаційна стала Гауса;

$k = 86400 / 149597870$ – коефіцієнт, необхідний для переведення одиниць вимірювань, виражених у $\text{км} \cdot \text{сек}^{-1}$, в одиниці вимірювань, які виражені в $a.o. \cdot \text{добу}^{-1}$ (у добі 86400 секунд);

$R_{EQ} = 6378137$ – екваторіальний радіус Землі (m), відповідно до моделі Землі WGS-84;

$f_{const} = 1 / 298,257223563$ – стиснення Землі (WGS-84);

$\omega_E = 7292115 \cdot 10^{-11} (\text{рад} \cdot \text{сек}^{-1})$ – кутова швидкість обертання Землі (WGS-84);

$g_0 = 9.7803326 (m \cdot \text{сек}^{-2})$ – прискорення сили тяжіння на екваторі Землі (WGS-84);

$\beta_g = (5/2) \left(\frac{\omega_E^2 R_{EQ}}{g_0} \right) - f_{const} = 0.0053166$ – коефіцієнт, який встановлює

залежність між стисненням Землі, величиною відцентрової сили і значенням сили тяжіння та значеннями сили тяжіння на екваторі й на полюсі.

ВСТУП

Актуальність дослідження. Дисертація присвячена розв'язанню сукупності наукових завдань у метеорній астрономії, пов'язаних з удосконаленням методів спостережень, обробки спостережного матеріалу й аналізу отриманих результатів при вивченні кінематичних і фізичних властивостей метеорних тіл за даними наземних телівізійних спостережень. Під терміном “метеорне тіло” мається на увазі тверде міжпланетне тіло (метеороїд) розміром від 10 мкм до 10 м, що створює метеор при вторгненні в земну атмосферу зі швидкістю вище $11,2 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Радіант метеорного тіла – це точка на небесній сфері з координатами, які визначають місце перетинання продовженої назад траєкторії метеорного тіла з небесною сферою. Існує комплекс міжпланетних тіл (астероїди, комети, метеороїди), що мають при зіткненні із Землею радіанти поблизу положення Сонця на небесній сфері (на елонгаціях менше 30° від Сонця). Подібні об'єкти є найнебезпечнішими через відсутність сучасних технічних можливостей (наземної або космічних) їхньої завчасної фіксації ще на підльоті до Землі з геліоцентричних відстаней ≤ 1 а.о. з боку Сонця. Відомими прикладами таких небесних тіл є: астероїд 99942 Apophis (2004 MN₄), астероїд 2008 TC₃ (зіткнення із Землею відбулося 7 жовтня 2008 року), Челябінський метеороїд (зіткнення із Землею відбулося 15 лютого 2013 року). Астероїд 2008 TC₃ відноситься до того рідкого випадку, коли його відкрили за 19 годин до зіткнення, а астрометричні спостереження дозволили розрахувати його геліоцентричну орбіту, час і місце падіння на земну поверхню у вигляді метеоритного дощу Almahata Sitta [191]. Астероїд 99942 Apophis (2004 MN₄) пройде мимо Землі 13 квітня 2029 року на відстані всього 5 - 6 земних радіусів. Проте, траєкторію Апофіса важко передобчислити надалі через украй близьке проходження поблизу Землі, тому потрібні систематичні ретельні астрометричні спостереження [27].

15 лютого 2013 року поблизу Челябінська (РФ) відбулося вторгнення в земну атмосферу невеликого (порядку 20 м) небесного тіла. Виникла в момент руйнування космічного тіла ударно-звукова хвиля, яка викликала великі руйнування будівель, і це явище супроводжувалося численними травмами (зафіксовано більше 1650 потерпілих) та панікою серед людей. Важливо, що болід спостерігався в денний час доби (на світанку), а метеороїд рухався з боку Сонця: його радіант розташовувався на елонгації порядку 20° від положення Сонця на небесній сфері. Для оцінки ступеня загрози важливо знати кінематичні й фізичні властивості потенційно-небезпечних космічних тіл. Але практика показала: незважаючи на наявність великої кількості відео- і фотофіксацій Челябінського явища, у наукового співтовариства не виявилось добре розроблених експрес-методів для вимірювань і розрахунків кінематичних характеристик болідних тіл за спостереженнями у світлий час доби. У дисертаційній роботі представлені розроблені автором необхідні методи для таких вимірювань і розрахунків кінематичних параметрів метеорних і метеоритоутворювальних болідних тіл за даними наземних відеоспостережень.

Ще одним класом небесних тіл, з радіантами поблизу сонячної й антисонячної області неба і, які несуть потенційну загрозу в навколосемному просторі, є т.зв. “дряпаючі Сонце” комети (англ. Sun-grazing comets) або SOHO-комети. При зближенні із Землею небезпечні як самі комети [72], так і пилові тіла й великі осколки, що утворилися в результаті їх дефрагментації поблизу Сонця. Процеси, пов'язані із Сонцем (сонячний вітер, гравітаційний вплив, високі температури й т.д.) на близьких відстанях приводять до дефрагментації ядер близькосонячних комет, відносно швидкому частковому або повному розсіюванню створених ними кометних метеороїдних роїв, випаровуванню частини кометних пилових частинок, зміни фізико-хімічних характеристик речовини метеороїдів. Установилася практика, для стислості, майже параболічні (період $P > 200$ років) орбіти комет і метеорних тіл з

перигелійною відстанню в орбітах ($q < 0,1$ а.о.) називати короткоперигелійними (в англійських наукових публікаціях використовується термін “short-perihelion”). Короткоперигелійні метеороїди, досягаючи Землі й вторгаючись у її атмосферу, створюють метеори. Виділяючи й досліджуючи їх, можна виявити розходження фізичних властивостей від інших метеороїдів, а також установити й пояснити причини цих розходжень. Такі відмінності у властивостях можуть бути проявом фізичних умов, у яких побували метеороїди поблизу Сонця. Деякі властивості речовини короткоперигелійних тіл ще недостатньо вивчені, але відомі. Так, автори публікацій [91, 139, 210, 157, 158] указують на існування залежності складу хімічних елементів (Mg, Na, Fe) у метеорних тілах від перигелійної відстані (для $q < 0,1$ а.о.) їхніх орбіт. Даний факт розглядають як результат термічного впливу на пилову частинку під час зближення із Сонцем на короткі дистанції. Такий процес втрати атомів, молекул і радикалів з поверхні твердого тіла при його нагріванні прийнято називати термічною десорбцією речовини даного тіла. Існує ще один термін цього фізичного явища - селективне випаровування. Але, у такому випадку, мається на увазі послідовний порядок випаровування атомів, молекул або радикалів одного або декількох елементів з багатоконпонентної речовини при нагріванні тіла. Фізичний механізм термодесорбції речовини короткоперигелійних метеорних тіл практично не вивчений через випадковий характер створених ними метеорів і рідкості фіксації їхніх спектрів з одночасним визначенням кінематичних і фізичних характеристик.

У найближчому майбутньому плануються запуски космічних зондів для вивчення Сонця на близьких від нього відстанях. Наприклад, по проекту космічний зонд “Solar Probe Plus”⁽¹⁾ наблизиться до поверхні Сонця на відстань до $9,5 R_{\odot}$. Це значно ближче до Сонця, ніж ті, що запускалися до цього, завдяки вдалим космічним проектам по вивченню Меркурія (порядку

¹ Solar Probe Plus <https://solarprobe.gsfc.nasa.gov>

0,3 - 0,4 а.о.). Виявлені при обробці наземних телевізійних спостережень і представлені в дисертації особливості у фізико-хімічних властивостях речовини короткоперигелійних метеорних тіл побічно показують, що КА, розміщений у геліоцентричній зоні радіусом менше ніж 0,1 а.о. ($21 R_{\odot}$), буде випробовувати найсильніші термодесорбційні навантаження, які призведуть до зміни фізико-хімічних властивостей і випаровування матеріалів конструкції КА. Таким чином, розглянуте у дисертаційній роботі питання про вивчення термічної десорбції метеорних тіл поблизу Сонця по наземним телевізійним спостереженням метеорів може мати практичне значення. З іншого боку, результати дисертаційної роботи актуальні у зв'язку з підвищеною увагою сучасної науки до області простору поблизу Сонця.

Крім того, представлені результати обробки спостережного матеріалу отриманого телевізійним телескопічним способом можна вважати актуальним у зв'язку з новітніми дослідженнями мікрометеороїдів (метеороїдів розміром від 10 мкм до 2 мм) які фіксуються в міжпланетному просторі за допомогою КА або наземними засобами спостережень (радіолокаційні й телескопічні). Метеори до $+12^m$ і навіть слабкіше виявлялися тільки радіолокаційним методом [50, 51, 86, 98, 99, 116, 117, 169, 186, 187], але мова в цьому випадку йде про іонізований слід, а не оптичне зображення метеора. Особливість найпоширеніших сучасних телевізійних оптичних спостережень полягає в застосуванні короткофокусної оптики з метою охопити якомога більшу частину небесної сфери й фіксувати найбільшу кількість метеорів. З іншого боку, така апаратура не дозволяє спостерігати метеори слабкіше $+5^m$. У дисертації представлені результати спостережень слабких (до $+10^m$) метеорів у телевізійному режимі із застосуванням світлосильних довгофокусних (140 - 540 мм) оптичних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Дисертаційна робота була та є складовою частиною наступних планових

НДР НДІ “Астрономічна обсерваторія” Одеського національного університету імені І.І. Мечникова:

- “Дослідження фізики і кінематики малих тіл Сонячної системи й пилової складової атмосфери Землі” (2000 - 2002 рр.), номер держаної реєстрації 0100U002881;
- “Дослідження міжпланетної речовини і його впливу на атмосферу Землі” (2003 - 2005 рр.), № держ. реєстрації 0103U003764;
- “Вивчення фізичних і кінематичних властивостей метеорної й пилової речовини й екологія верхньої атмосфери” (2006 - 2008 рр.), № держ. реєстрації 0107U006647;
- “Вивчення фізичних і кінематичних властивостей метеорних часток слабких метеорних потоків” (2009 - 2011 рр.), № держ. реєстрації 0109U000919.

Дисертаційна робота була та є складовою частиною наступних планових НДР НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна в рамках контракту ХНУ ім. В.Н. Каразіна з дослідницькою лабораторією армії США за темами:

- “Комп’ютерне моделювання розсіювання світла малими частинками довільної форми з використанням Sh-матричного підходу” (2015 р.), № держ. реєстрації W911NF1210344;
- “Метод фазових відносин для гранично шорстких поверхонь стосовно до виявлення людської присутності” (2016 р.), № держ. реєстрації W911NF1410622.

Мета та завдання досліджень. *Метою роботи є:*

1. Удосконалити існуючі методики базисних відеоспостережень і обробки спостережного матеріалу для визначення кінематичних і фізичних характеристик метеорних тіл, що створюють метеори яскравіше $+10^m$, у тому

числі тих, які мають радіанти поблизу Сонця на небесній сфері або спостерігаються у світлий час доби.

2. Вивчити особливості термічного впливу Сонця на фізико-хімічні властивості речовини метеороїдів з перигелійними відстанями орбіт менше ніж 0,1 а.о., і, які, під час вторгнення в земну атмосферу мають радіанти поблизу Сонця на небесній сфері.

Виходячи зі сформульованої мети, були поставлені й виконані наступні завдання:

1. Створена й досліджена автоматизована апаратура (метеорний патруль) для відеоспостережень телескопічних (до $+10^m$ видимої яскравості) метеорів з високими часовою й позиційною характеристиками.

2. Створено Одеську базу даних телескопічних метеорних відеоспостережень в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова (більше 11000 метеорів до $+10^m$ за період спостережень 2003 - 2017 рр.).

3. Удосконалено методику спостережень, первинної обробки отриманого спостережного матеріалу, розрахунку основних атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів метеорів за телескопічними відеоспостереженнями із двох віддалених пунктів (з відстанню ~ 152 км між кореспондуючими пунктами). Методика реалізована у вигляді пакету програмного забезпечення.

4. Проведено позиційну обробку спостережного матеріалу, отриманого під час базисних (з відстанню 152.7 км між кореспондуючими пунктами) телескопічних відеоспостережень у серпні 2010 і 2011 роках. Отримано атмосферні й позаатмосферні кінематичні параметри (з оцінками погрешностей) метеорних тіл.

5. Удосконалено методику для обчислення кінематичних параметрів метеоритоутворювальних болідів, що спостерігались у світлий час доби. Метод застосований для обчислення атмосферних і позаатмосферних

кінематичних параметрів Челябінського метеороїда під час його падіння на поверхню Землі 15 лютого 2013 р.

6. Вивчено особливості термічного впливу на фізико-хімічні властивості метеорних тіл, які зближаються із Сонцем на геліоцентричні відстані менше ніж 0,1 а.о. за допомогою накопичених науковим співтовариством позиційних, фотометричних і спектральних спостережень метеорів, із залученням результатів експериментальних досліджень по випаровуванню зразків метеоритів, аналізу спостережної бази даних близькосонячних комет і метеорів.

Об'єкт дослідження: метеори в атмосфері Землі; телескопічні метеори; потенційно небезпечні для Землі метеороїди; метеороїди що зближуються на короткі дистанції ($< 0,1$ а.о.) до Сонця.

Предмет дослідження: розробка методик наземних відеоспостережень і обробки спостережного матеріалу для визначення кінематичних і фізичних параметрів метеорних тіл; вивчення ефектів, пов'язаних з термічним впливом на метеорні тіла в близькій ($< 0,1$ а.о.) до Сонця області простору.

Методи дослідження:

1. Відеоспостереження метеорів в атмосфері Землі.
2. Статистичний аналіз бази даних: позиційних, фотометричних, спектральних спостережень комет і метеорів, лабораторних досліджень метеоритної речовини, результатів експериментів по вивченню фізико-хімічних властивостей метеороїдів.
3. Модельні розрахунки, побудовані на результатах позиційних і спектральних спостереженнях метеорів, теоретичних і експериментальних даних про випаровування металів і зразків метеоритів при високих температурах у вакуумі.

Наукова новизна отриманих результатів:

Уперше:

1. Створено Одеську базу даних телескопічних метеорних відеоспостережень в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова (більше 11000 метеорів до $+10^m$ за період спостережень 2003 - 2017 рр.).

2. Створено каталог високоточних атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів (з оцінками похибок розрахунків) спостережених метеорних тіл у результаті позиційної обробки базисних (152,7 км) телескопічних відеоспостережень у серпні 2010 і 2011 р.

3. Виявлені групи радіантів метеорних тіл, генетично пов'язаних з кометними сімействами: радіанти з елонгаціями від Сонця 30° і 155° - сімействам комет Марсдена й Крахта, а радіанти з елонгаціями від Сонця 50° і 135° - сімейству комет Крейца.

4. Виявлено різке зменшення чисельності метеорних тіл з $q < 0,08$ а.о., що вказує на існування зони, з якої, при наближенні до Сонця, починається істотне випаровування речовини метеороїдів.

5. Виявлено в розподілі за масами метеорних тіл систематичне відносне зменшення значень мас для метеороїдів, які зафіксовані після проходження ними перигелію на відстанях менше 0,1 а.о. від Сонця. Це пояснюється випаровуванням частини речовини метеороїдів при проходженні перигелійної області.

Удосконалено:

1. Алгоритм первинної обробки отриманого спостережного матеріалу, методи розрахунку основних атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів метеорів по телескопічних відеоспостереженнях із двох віддалених пунктів (з відстанню ~ 150 км між кореспондуючими пунктами). Методики реалізовані у вигляді пакету програмного забезпечення.

2. Методику для обчислення основних кінематичних параметрів метеоритоутворювальних болідів, що спостерігаються у світлий час доби. Метод застосований для обчислення атмосферних і позаатмосферних

кінематичних параметрів Челябінського метеороїда під час його падіння на поверхню Землі 15 лютого 2013 року.

Одержало подальший розвиток: вивчення кінематичних і фізичних властивостей метеороїдів, які при зіткненні із Землею мають на небесній сфері радіанти поблизу Сонця.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропонований у дисертації експрес-метод дозволяє обчислювати кінематичні параметри болідів за наземними телевізійними спостереженнями у денний час доби.

2. Одеська база даних безперервних телескопічних відеоспостережень метеорів (більше 11000 відеофайлів за 2003 – 2017 рр. з метеорами до $+10^m$) є в даний момент унікальною та становить інтерес для дослідження метеорів, які раніше були недоступні в оптичному діапазоні.

3. У зв'язку з підвищеною увагою сучасної науки до області простору поблизу Сонця, наземні телевізійні спостереження метеорів представляють практичне значення для вивчення термічного впливу на фізико-хімічні властивості речовини метеороїдів поблизу Сонця.

Достовірність і обґрунтованість результатів дослідження. Методика спостережень і обробки спостережного матеріалу обґрунтована багаторічними систематичними спостереженнями метеорів, якісним та кількісним узгодженням результатів дисертаційної роботи з дослідженнями інших авторів.

Особистий внесок дисертанта:

1. Брав активну участь у створенні й модернізації телевізійного метеорного патруля в Крижанівці (Одеса) НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ ім. І.І. Мечникова, а також експедиційної апаратури для спостережень метеорів. Результати опубліковані в роботах [1-15, 29, 31].

2. Проводив систематичні спостереження метеорів на метеорному патрулі НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ ім. І.І. Мечникова в

Крижанівці (2003-2011 рр.). Особисто автором дисертації було проведено 696 нічних спостережень (з яких 342 ночі були вдалими за погодних умов) та отримано 1166 відеофайлів з метеорами. Результати опубліковані в роботах [1-15].

3. Брав участь у метеорних експедиціях на острів Зміїний у Чорному морі (Одеська обл.) у якості астронома-спостерігача по програмах виконання наукових досліджень від ОНУ імені І.І. Мечникова в 2005, 2007, 2008, 2010, 2011 роках. За участю автора дисертації було проведено 150 нічних спостережень та отримано 480 відеофайлів з метеорами. Результати опубліковані в роботах [13, 25].

4. Брав участь у розробці методики метеорних спостережень, методик позиційної й фотометричної обробки метеорних зображень. У тому числі, створенні пакета програмного забезпечення для астрометричної обробки відеоспостережень одеської метеорної бази даних. Результати опубліковані в роботах [1-15, 29, 31].

5. Удосконалив метод і створив відповідне програмне забезпечення для обчислення елементів геліоцентричної орбіти метеорних частинок за спостереженнями в автоматизованому телевізійному режимі за допомогою ССТV камер як реєстратор зображень. Результати опубліковані в роботах [25, 26].

6. Автором розроблений експрес-метод обчислення кінематичних параметрів болідних тіл, які спостерігалися у денний час доби. Методика успішно застосована для обробки спостережень метеоритоутворювального боліду 15 лютого 2013 року в Челябінській області (РФ). Результати опубліковані в роботах [16,18, 23].

7. Автором виявлені особливості прояву ефекту термічної десорбції речовини метеороїдів поблизу Сонця й дано теоретичне обґрунтування цих особливостей [21, 24, 27, 30, 32].

8. Брав участь у спостереженнях і обробці позиційних і фотометричних параметрів потенційно небезпечних для Землі астероїдів [19], зокрема астероїда 99942 Apophis (2004 MN₄) [27].

Апробація результатів дисертації й публікації. Доповіді з результатами, покладені в основу дисертації, представлялися на конференціях:

1. У роботі [1]. Міжнародна наукова конференція “Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes”, Травень 17 - 20, 2004, Миколаїв, Україна.

2. У роботі [2]. Міжнародний науковий семінар “Спостереження штучних супутників Землі й космічного сміття” 3-7 жовтня, 2004, Львів, Україна.

3. У роботі [3]. Міжнародна конференція “САММАС-2005”, Вересень 25 - Жовтень 1, 2005, Вінниця, Україна.

4. У роботі [4]. Міжнародна конференція “Astronomy and space physics at Kyiv university”, Травень 22 - 26, 2005, Київ, Україна.

5. У роботі [5]. Міжнародна конференція “Enlargement of collaboration in ground-based astronomical research in see countries. Studies of the near-earth and small bodies of the solar system”, Вересень 25 - 28, 2006, Миколаїв, Україна.

6. У роботі [7]. Четверта наукова конференція пам. Богдана Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, 19 - 21 жовтня, 2006, Львів, Україна.

7. У роботі [8, 9]. Міжнародна меморіальна наукова конференція "Сучасні проблеми астрономії", присвячена 100-річчю від дня народження професора Володимира Платоновича Цесевича. 12-18 серпня, 2007, Одеса, Україна.

8. У роботах [11, 12]. Міжнародна астрономічна конференція “Навколоземна астрономія - 2007”, Вересень 3 - 7, 2007, Терскол, Кабардино-Балкарія, Росія.

9. У роботі [14]. Всеросійська астрономічна конференція (ВАК-2010) “Від епохи Галілея до наших днів”, Вересень 13 - 18, 2010, Н. Архиз, Росія.

10. У роботах [16, 17]. Міжнародна конференція “Навколоземна астрономія-2013”, Вересень 7 - 11, 2013, Туапсе, Росія.

11. У роботі [18]. Міжнародна науково-практична конференція “Астероїди та комети. Челябінська подія та вивчення падіння метеорита в озеро Чебаркуль”, Червень 21 - 22, 2013, Чебаркуль, Росія.

12. У роботі [20]. 33-rd International Meteor Conference (IMC2014), Вересень 18 - 21, 2014, Giron, France.

13. У роботі [21]. Міжнародна конференція “V Бредихінські читання”, Травень 12 - 16, 2014, Заволжськ, Росія.

14. У роботі [22]. Міжнародна конференція “Asteroids, Comets, Meteors” (АСМ), Червень 30 - Липень 4, 2014, Helsinki, Finland.

15. У роботі [25]. IX Міжнародна конференція “Near-Earth Astronomy” (NEA-2015), Август 31 - Вересень 5, 2015, Терскол, Кабардино-Балкарія, Росія.

16. У роботі [26]. 5-th Gamow International Conference in Odessa “Astrophysics and Cosmology after Gamow: progress and perspectives”, 16-23 August, 2015, Odessa, Ukraine.

17. У роботах [29, 30, 31]. Міжнародний науковий семінар “Радіометеори, метеори й міжпланетна складова: поблизу та на відстані”, пам'яті Б.Л. Кащеєва, Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), 15 березня 2016, Харків, Україна.

18. У роботі [32]. Міжнародна наукова конференція “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy”, 2016, Mykolaiv, Ukraine.

Крім того, результати представлялися у вигляді усних доповідей у НДІ “Астрономічна обсерваторія” Одеського національного університету імені І.І. Мечникова та НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

Публікації. По темі дисертації опубліковано: 6 статей у наукових спеціалізованих виданнях [6, 10, 15, 23, 24, 27]; 1 публікація в монографічному збірнику [13]; 6 статей – у збірниках праць наукових конференцій [11, 12, 18, 25, 28, 31]; 15 – у вигляді тез наукових доповідей [1, 3 - 5, 8, 9, 16, 17, 19, 20, 22, 26, 29, 30, 32].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації (9 сторінок), переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел кількістю 219 найменувань (27 сторінок), вона містить 42 рисунки, 13 таблиць та 3 таблиці в додатку (4 сторінки). Обсяг дисертації складає 150 сторінок, загальний – 195 сторінок.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРІВ

У даному розділі в короткій формі розглянуті різні методи, апаратура та база даних спостережень метеорів і болідів, породжених метеороїдами широкого діапазону мас під час їхнього вторгнення в земну атмосферу. Показано важливість і унікальність застосування довгофокусної світлосильної оптики в сполученні із КМОН-детекторами для відеоспостережень метеорів до $+10^m$.

1.1. Методи й апаратура для оптичних спостережень метеорів.

Особливість астрономічних спостережень метеорів полягає в тому, що невідомими є ні область на небесній сфері, ні час, коли відбудеться подія. Крім того, метеори в атмосфері спостерігаються на протязі порядку секунд і менше (боліди, які викликані падінням великих метеоритних тіл, спостерігаються протягом до десятків секунд). Все це пред'являє до апаратури та методики спостережень особливі вимоги, які намагалися дотримувати в практиці метеорних досліджень. З появою нових технологій модифікувалася апаратура та методи спостережень. Ще на зорі становлення спостережних методів метеорної астрономії стали практикувати метеорне патрулювання, яке полягає в тім, що панорамна апаратура постійно готова до приймання сигналу з деякої області небесної сфери для фіксації метеору. Так, наприклад, метеорні дослідження в тематиці НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова проводились протягом багатьох десятиліть. З 1957 року по програмі Міжнародного Геофізичного Року на обсерваторії функціонували три базисних станції фотографічного метеорного патрулювання [59], а також була розроблена методика обробки спостережного матеріалу [36]. Даний фотографічний метеорний патруль на базі однотипних камер НАФА 3С/25 (об'єктив Уран-9, діаметр $D=100$ мм, фокусна відстань $F=250$ мм, розмір кадру 180×240 мм, поле зору $39^\circ \times 53^\circ$) міг фіксувати фотографічним методом метеори яскравіше нульової зоряної

величини. Відповідно до досліджень [50], для таких метеорних патрульних установок середнє значення порогу реєстрації відповідає $-1.5^m \pm 1.0^m$. Більш слабкі метеори могли фіксувати тільки такі унікальні прилади, як телескопи системи Супер-Шмідт, але навіть у них поріг реєстрації не перевищував $+3.5^m \pm 0.3^m$ [162]. Метеори до $+12^m$ і навіть слабкіше виявлялися тільки радіолокаційним методом, але мова в цьому випадку йде про іонізований слід, а не оптичне зображення метеора. Таким чином, слабкі метеори могли бути доступні вивченню тільки за допомогою візуальних телескопічних спостережень. Візуальні спостереження, коли метеор перебував у полі зору телескопа долі секунди, були обтяжені значно більшими похибками, пов'язаними зі спостережною селекцією.

Існують спостережні комплекси різних конструкцій, створені на основі телевізійних передавальних трубок, електронно-оптичному перетворювачі (ЕОП) або комбіновані ширококутні телевізійні системи [37, 38, 39, 41, 43, 68, 128, 148, 149, 166]. Такі телевізійні системи дозволяють реєструвати метеори до $+5^m - +9^m$.

Одержати уявлення про деякі оптичні метеорні патрулі, методикку спостережень і результати обробки спостережного матеріалу можна на підставі робіт: [31, 33, 34, 35, 54, 55, 56, 57, 62, 63, 65, 68, 69, 70, 100, 114, 126, 135, 144, 148-153, 155, 173, 178, 179, 182, 199, 201, 202, 207, 208, 211, 214-217]. У табл. 1.1 для порівняння розміщені спостережні можливості патрулів з різними способами реєстрації метеорів. Насамперед, необхідно відзначити, що оптичні метеорні патрулі сильно відрізняються за апертурними характеристиками. Так, наприклад, для фіксації болідів використовуються камери з об'єктивами “риб'яче око” (fish-eye) у сполученні з фото та ПЗЗ-приймачами [35]. Такий тип об'єктива має малу позиційну роздільну здатність, але має широке поле зору (до 180°). У Японії (Токіо) на обсерваторії Kiso на 1.05 метровий телескоп системи Шмідта був установлений КМОН-сенсор великих розмірів (20 x 20 см, 1280 x 1248

пікселів) виготовлений фірмою Canon Inc. [211]. Попередній аналіз, побудований на спостереженнях метеорів потоку Гемінід в 2012 році, показав, що такий інструмент забезпечує поле зору $3^\circ \times 3^\circ$ і дозволяє фіксувати слабкі метеори (порядку 10^m) у телевізійному режимі із частотою 60 кадрів за секунду. У роботі [173] представлено цікаві результати використання телескопа з діаметром дзеркала 3 метри та ПЗЗ-приймачем з полем зору 0.28° . Це приклад застосування оптичного приладу з найбільшою апертурою, коли-небудь використовуваної для спостережень метеорів. Приймач випромінювання даного інструмента фіксує зірки до $+18^m$, метеори від $+5^m$ до $+10^m$, що відповідає фотометричним масам від 10^{-7} кг до 10^{-9} кг. Важливо, що зазначений діапазон мас метеороїдів раніше був найменш вивчений в оптичному діапазоні, так само як і були відсутні дотепер високоточні каталоги з їхніми елементами орбіт, кінематичними й фізичними характеристиками. Тому в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова з 2003 р. для спостережень метеорів до $+10^m$ за участю автора дисертації почали застосовувати довгофокусну світлосильну оптику в сполученні зі світлочувливими відеокамерами (табл. 1.1). У другому розділі будуть докладно розглянуті характеристики даного метеорного патруля, методика обробки спостережного матеріалу й деякі результати по темі дисертації, у тому числі, створений каталог з кінематичними параметрами метеорів до $+10^m$.

Все частіше в інтернет-мережі випадкові свідки розміщують спостереження болідів, які зафіксовані на “побутові” відеокамери. Так, 15 лютого 2013 року метеоритоутворювальний болід поблизу Челябінська був зафіксований автомобільними відеореєстраторами й фотокамерами, які не були спеціально сконструйовані для спостережень метеорів [96].

Таблиця 1.1

Спостережні характеристики метеорних патрулів. Δt – часова роздільна здатність апаратури, ΔH – похибка визначення висот метеорів, ΔR – похибка визначення координат радіанта, ΔV – похибка визначення швидкості метеороїда, lm – гранична зоряна величина метеора, N – кількість метеорів у базі даних за зазначений період спостережень.

База даних	Δt	ΔH	ΔR	ΔV	lm	Період спостережень	N	Джерело
	сек.	км	(°)	%		роки		
Фото								
DMS	0,04	0,02	0,08	0,6	+0	1972-2001	1344	[90]
SuperSchmidt	0,04	~ 2	~ 1	2,8	+3.5	1951-1953	2529	[162]
SuperSchmidt	0,04	0,05	0,12	1	+3.5	1951-1953	413	[132]
“Риб’яче око”	0,04				-4	2006	34	[35]
Одеса		0.1	0,05	0.4	+0			[36, 49]
ПЗЗ, CCTV + широкоформатні об’єктиви								
Ondrejov	0,017	0,03	0,17	0,6	+5	1998-2001	817	[146]
DMS	0,033	0,10	0,24	1,5	+6	1991-2002	1180	[104]
SAMS	0,017	0,06	0,31	1,3	+4	2010	2495	[134]
SonotaCo	0,017	0,10	0,6	2,8	+5	2007-2016	231010	[196, 134]
Миколаїв	0,04	1-2	0,5	0.8 - 1	+5	2012-2015	5557	[29]
ФЕП, телевізійні передавальні трубки								
Київ	0,02	0,1-0,2	~ 0,1	0.8 - 3	+4,5			[29]
FAVOR	0,13				+9	2006-2009	13309	[88]
Радар								
Adelaide I	0,01	0,10	1,5	5	+6	1960-1961	2092	[169]
AdelaideII	0,01	3,0	1,5	5	+8	1968-1969	1667	[117]
Harvard(I,II)	0,003	3,0	5	5	+10	1961-1969	39025	[186, 187]
AMOR(I,II)	0,003	1,0	0,8	10 (3-20)	+14	1990-1999	~ 1,5·10 ⁶	[116,86]
CMOR	0,002	3,0	3	5	+8	1999-2006	3·10 ⁶	[98, 99]
Харків (МАРС I, II)	0,003		2 (0,8-5)	5 (3-20)	+12	1967-1978	~ 3·10 ⁵	[50, 51]
Телескоп системи Шмідта (F = 504 мм) + CCTV								
АО ОНУ	0.02	< 0.2	0,08 - 1,5	0.3 - 3	+10	2004 - 2017	> 11000	Дисерт.

На цей час каталог таких спостережень містить 960 відео з різними аспектами події, у тому числі 400 відео безпосередньо з зафіксованим розвитком явища в земній атмосфері. Але, незважаючи на наявність великої кількості відео- і фотофіксацій Челябінського явища, у наукового співтовариства не виявилось добре розроблених експрес-методів для вимірювань і розрахунків кінематичних характеристик болідних тіл за спостереженнями у світлий час доби. Знадобився досить тривалий час трудомістких експедиційних робіт із прив'язки місць спостережень відеореєстраторами, координатній прив'язці, дослідженню оптичних характеристик відеореєстраторів і ін., перш ніж були отримані з високою точністю швидкість руху болідного тіла, параметри його траєкторії, елементів геліоцентричної орбіти [177]. У дисертаційній роботі (параграф 3.7) представлений розроблений автором один з можливих “швидких” методів для розрахунків кінематичних параметрів метеоритоутворювальних болідних тіл за даними наземних відеоспостережень у денний час доби.

1.2. Каталоги елементів орбіт і кінематичних параметрів метеорних тіл.

Для обчислення кінематичних параметрів і елементів геліоцентричної орбіти метеороїда, що породжує метеори в атмосфері Землі, можна застосувати радіолокаційний, фотографічний, телевізійний методи (табл. 1.1). Але кожний зі способів, має свої переваги й недоліки, що впливають на точність значень елементів орбіт і на статистику отриманого спостережного матеріалу. Основними вихідними параметрами для обчислення елементів орбіт метеороїдів за спостереженнями створюваних ними в атмосфері Землі метеорів, є координати радіанта й позаатмосферна швидкість. Оцінити точність, з якою визначаються зі спостережень елементи орбіт твердих частинок зафіксованих фотографічним способом, можна диференціюючи вихідні формули, по яких ці елементи обчислювалися й, аналізуючи джерела

похибок. Так, у роботі [74] стверджується, що середні погрішності в радіанті та швидкості метеорів, фотографованих метеорним патрулем, становили 3' і 1,4%, відповідно. Статистичному аналізу точності обчислення елементів орбіт 2529 метеороїдів, зареєстрованих протягом 1952-1954 рр. фотографічним методом за допомогою двох Baker Super-Schmidt камер, рознесених на 28,6 км одна від другої, приділена увага в [162]. Авторами показано, що точність визначення координат радіанта швидким графічним способом $\sim 3^\circ$, а позаатмосферна швидкість обчислювалася з точністю порядку 3%. При цьому, по перигелійній відстані похибка становить $\pm 0,029$ а.о., а по нахиленню орбіти $\pm 2^\circ$.

Аналіз точності обчислених елементів орбіт по відеоспостереженнях проведений в [136]. Автори стверджують, що отримані значення швидкостей метеорів (з точністю до $0,1 \text{ км}\cdot\text{сек}^{-1}$) і елементів орбіт з деякою кількістю значущих знаків є реальними завдяки сучасним можливостям точної фіксації моментів прольоту метеорів, урахування форми Землі для визначення геоцентричного положення метеороїда та інше. Але все-таки, необхідно вважати помилковим твердження в зазначеній вище публікації про точність порядку $0,1 \text{ км}\cdot\text{сек}^{-1}$ для значень швидкостей метеорів, одержуваних радіолокаційним методом. Детальне дослідження цього питання описано, наприклад, у роботі [50]. Радіолокаційний метод дозволяє проводити спостереження великої кількості метеорів від $+7^m$ до $+15^m$ цілодобово й незалежно від погодних умов. Але число зафіксованих метеорів, для яких можливо одержати впевнені кінематичні параметри сильно залежить від технічних характеристик радіолокаційної апаратури. У роботі [50] показано, що для різних швидкостей радіолокаційних метеорів від 20 до $70 \text{ км}\cdot\text{сек}^{-1}$, похибка у швидкості змінюється від $\pm 1,3$ до $\pm 16,8 \text{ км}\cdot\text{сек}^{-1}$, відповідно. Таким чином, бачимо, що реальні похибки у швидкості за радіолокаційними спостереженнями, як мінімум, на порядок більше чим стверджується в [136]. У випадку швидкостей $V > 30 \text{ км}\cdot\text{сек}^{-1}$ – величини похибок у положенні

радіанта будуть приблизно $\pm 2,5^\circ$. При швидкостях $V < 30 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$ – похибки зростають зі зменшенням швидкості. Для найбільш повільних метеорів середні похибки в положенні радіантів можуть доходити до $\pm 5^\circ$. Експериментально за радіолокаційними спостереженнями 298 метеорів потоку Гемініди були обчислені середні квадратичні похибки одного вимірювання елементів орбіти. Так, по перигелійній відстані похибка становить $\pm 0,028$ а.о., а по нахилу орбіти $\pm 5,6^\circ$. Порівняльний аналіз погрешностей обчислення основних кінематичних параметрів метеорів з використанням різних методів спостережень для відомих каталогів приводиться в публікації [134]. З узагальнювальної таблиці, що приводиться авторами, і графіка бачимо (див. табл. 1 і рис. 1 зазначеної публікації), що похибки у швидкостях за радіолокаційними спостереженнями становлять від 3 до 20 %, а точність визначення метеорного радіанта (від $0,8^\circ$ до 5°). Таким чином, при радіолокаційному методі спостережень положення радіанта та швидкості визначаються в загальному гірше, ніж по фото- і відеоспостереженням.

Серед відомих каталогів орбіт метеорних тіл був обраний каталог SNM (SonotaCo Network Members) відеоспостережень метеорів SonotaCo⁽²⁾, як найбільше статистично значимий і придатний для нашого дослідження. У роботі [195, 196] міститься опис каталогу метеорів з яскравостями від $+5^m$ до -5^m , що відповідає діапазону мас метеороїдів від 10^{-3} до 10 г. Спостереження проводилися широкоформатними CCTV-камерами (більше 100 камер, розташованих в 25 пунктах по всій території Японії). За 2007 - 2016 рр. спостережень було зафіксовано 231010 метеорних частинок, для яких визначені геліоцентричні орбіти. Для каталогу SNM, згідно [134], похибки у швидкостях становлять у середньому 2,8%, а точність визначення метеорного радіанта $0,6^\circ$.

² SonotaCo <http://sonotaco.jp/doc/SNM/>

У публікації [125] вказується на великий відсоток гіперболічних або параболічних орбіт у каталозі SNM. Автори дослідження вважають, що багато з них є “помилкові” у зв'язку з не врахуванням атмосферного гальмування метеороїда. На додаток до цієї думки можна припустити що, масштаб зображень широкоформатних камер не дозволяє надійно розраховувати гальмування частинок для метеорів із короткими кутовими довжинами. Особливо похибка у визначенні гальмування відчутно зростає для дуже швидких метеорів. Крім того, необхідно звертати увагу й на інші джерела похибок (наприклад, залежність від зенітної відстані радіанта, кут зближення, число кадрів з метеорним зображенням по яких визначається гальмування й ін.). На жаль, автори каталогу SNM не приводять значення довірчих інтервалів індивідуально для кожного з елементів орбіт, а в публікаціях, наприклад [195], тільки для окремих метеорних потоків вказуються обчислені середні похибки елементів орбіти в рої. Тому, для “зниження впливу” явно помилкових орбіт на результат проведеного статистичного аналізу в четвертому розділі дисертаційної роботи відібрані орбіти з ексцентриситетом $e < 1$ і не розглядалися⁽³⁾ метеори з гіперболічними та параболічними швидкостями.

1.3. Каталоги спектральних спостережень метеорів.

У четвертому розділі дисертації буде докладно показано, що існують варіації кількісного складу хімічних елементів у складі речовини метеорних тіл залежно від геліоцентричної відстані. Особливо це проявляється для метеороїдів з короткоперигелійними орбітами ($q < 0,1$ а.о.). Даний факт можна пояснити результатом термічного впливу на пилову частинку в навколосонячній області [91, 139, 210].

Методика спектральних спостережень і результати опубліковані, наприклад в [40, 46, 92, 93, 157, 210]. Незважаючи на те, що спектральні

³ Крім випадків, коли наявність метеорних частинок з ексцентриситетами ≥ 1 в аналізованій з конкретною метою вибірці, не впливає на результат статистичного або кількісного аналізу.

спостереження метеорів проводилися інтенсивно в СРСР (Душанбе, Ашхабад, Одеса, Сімферополь), Канаді, США, Чехословаччині, все ж вдалося одержати незначну кількість спостережного матеріалу. Насамперед, це було зв'язано не тільки з випадковим характером метеору, але й із трудомістким процесом фотографічного методу фіксації спектра метеора. Сучасні приймачі випромінювання ПЗЗ і КМОН-детектори дозволяють застосовувати їх для спектروفотометрії метеорів більш ефективно. В основному, такі системи фіксують спектри метеорів яскравіше -3^m . На цей час існує невелика кількість спектральних спостережень метеорів, які супроводжувалися обчисленнями елементів орбіт метеорних частинок.

Для виявлення ефекту термічного впливу Сонця на хімічний склад речовини метеорних тіл використовувалися опубліковані результати позиційних і спектральних спостережень метеорів. Так, в [210] представлено каталог метеорних спектрів з низькою роздільною здатністю. База даних містить у собі метеори спорадичного фону та які належать до різних потоків. Діапазон яскравостей метеорів від $+2^m$ до -3^m , що відповідає розмірам метеороїдів 1 - 10 мм. Каталог містить геліоцентричні елементи орбіт для всіх метеорів. Більшість спостережень проводилися в періоди активності великих метеорних потоків у період 2006 - 2012 рр. Спектри метеорів були класифіковані відповідно до відносної інтенсивності низькотемпературних емісійних ліній магнію (Mg), натрію (Na) і заліза (Fe). Автори відзначили типові варіації вмісту Na для метеорів потоку Гемінід. По вмісту натрію були визначені три популяції метеорних тіл. До першого віднесені залізні метеороїди, що мають астероїдно-хондритове походження. Серед залізних метеорних тіл виявлений метеороїд з малою перигелійною відстанню (0,11 а.о.). До другої популяції належать всі метеороїди, у яких натрій виснажений у результаті ефекту термодесорбції. До третьої популяції віднесені метеорні тіла кометного походження з відсутністю Na у своїй сполуці. Було висловлене припущення, що тривалий вплив космічних променів на

поверхню комет у хмарі Оорта та розпад їх кори є причиною походження даної популяції метеороїдів.

Крім вищевказаного каталогу в дисертаційній роботі використовувалися спектральні й позиційні спостереження метеорів інших авторів, зокрема – опубліковані результати спостережень іспанської метеорної мережі SPMN (SPanish Meteor Network)⁽⁴⁾ [157]. У цих публікаціях так само відзначалися варіації вмісту натрію залежно від перигелійної відстані.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.

Об'єднання оптичних можливостей телескопа (довгофокусних світлосильних об'єктивів) і технічних характеристик КМОН-детектора (ССТV-камер) дозволяє змістити поріг реєстрації метеорів в оптичному діапазоні до $+5^m \div +10^m$. Такий діапазон метеорних тіл раніше був найменш вивчений в оптичному діапазоні, так само як і були відсутні дотепер високоточні каталоги з їхніми елементами орбіт, кінематичними й фізичними характеристиками. Тому в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І.Мечникова з 2003 р. для спостережень метеорів до $+10^m$ за участю автора дисертації почали застосовувати довгофокусну світлосильну оптику в сполученні зі світлочувливими відеокамерами. Таким чином, виникає необхідність у розробці методики телескопічних телевізійних спостережень і обробки спостережного матеріалу.

Поява КМОН-детектора призвело до ще однієї унікальної можливості - відеофіксації болідів сучасними відеокамерами, призначеними не для астрономічних спостережень (автомобільні відеореєстратори, камери охоронного спостереження та ін.). Виявилось, що добре розроблені методи обробки подібних відеоданих з метою одержати кінематичні параметри

4

SPMN , www.spmn.uji.es

зафіксованих у нічний і денний час доби болідів, відсутні. Розв'язок даного завдання є актуальним.

Застосування широкоформатних CCTV-камер у цей час найпоширеніше, тому що вони дозволяють із найбільшою ефективністю патрулювати й фіксувати метеори яскравіше $+5^m$ на великій площі видимої небесної півсфери. Каталоги з такими спостереженнями статистично значимі й придатні для дослідження з теми дисертації.

Існують варіації кількісного вмісту хімічних елементів у складі речовини метеорних тіл залежно від геліоцентричної відстані. Особливо це проявляється для метеороїдів з перигелійними орбітами $q < 0,1$ а.о. Даний факт можна пояснити результатом термічного впливу на пилову частинку в навколосонячній області. Але через випадковий характер і рідкість фіксації метеорів у спектрах, яких, спостерігається аномально малий вміст певних хімічних елементів, – фізичний механізм термодесорбції близькосонячних метеорних тіл практично не вивчений. Ця обставина вимагає проведення статистичного аналізу існуючої бази спостережних даних і теоретичного обґрунтування знайдених закономірностей. З іншого боку, існує можливість вивчення навколосонячної пилової речовини методами метеорної астрономії, зокрема, методами наземних оптичних спостережень метеорів.

РОЗДІЛ 2. АПАРАТУРА ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ МЕТЕОРІВ, МЕТОДИКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОБРОБКИ

У даній главі розглядається апаратура, методика спостережень і первинної обробки спостережного матеріалу, що застосовувалась за участю автора при виконанні дисертаційної роботи.

2.1. Метеорний патруль НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова.

В Одесі спроби використовувати нові телевізійні методи почалися з 2000 року, але тільки в 2003 році був створений за участю автора перший зразок телевізійного метеорного патруля на базі світлосильного телескопа Шмідта, що із червня 2003 року й по сьогодні регулярно проводить метеорне патрулювання на спостережній станції Крижанівка [6, 119]. Як приймачі випромінювання використовувалися ССТV камери фірми Watec (Японія): LCL-902K, LCL-902H і LCL-902H2 з часовою роздільною здатністю 20 мс. У цей час метеорний патруль укомплектований наступними інструментами (рис. 2.1а):

- телескоп Шмідта 220/300 мм (діаметр корекційної пластини й діаметр дзеркала відповідно)⁽⁵⁾, $F=540$ мм, поле зору $36' \times 48'$;
- астрокамера з об'єктивом КО140 (поле зору $2^\circ \times 2,5^\circ$, $F=140$ мм, відносний отвір $F/1,8$);
- астрокамера з об'єктивом КР35 (поле зору $2^\circ \times 2,5^\circ$, $F=140$ мм, відносний отвір $F/1,8$);
- астрокамера з об'єктивом Nikon 85mm AF Nikkor (поле зору $4^\circ \times 4,5^\circ$, $F=85$ мм, відносний отвір $F/1,8$).

Прилади встановлені на екваторіальному монтуванні АПШ-4 і працюють у режимі гідуювання. Для спостережень з надкороткою базою створена азимутальна установка, яка знаходиться на відстані 50 м від

⁵ Спочатку використовувалась оптична система 170/300 мм (діаметр корекційної пластини і діаметр дзеркала, відповідно)

основного метеорного патруля. Установка оснащена астрокамерою з об'єктивом КО140. З 2003 року в рамках наукової програми ОНУ імені І.І.Мечникова проводяться метеорні спостереження на острові Зміїний (Одеська обл., Україна). На острові обладнані дві спостережні площадки, на яких під час експедиційних робіт здійснюються базисні та небазисні патрульні спостереження метеорів за допомогою експедиційного автоматичного метеорного патруля (рис. 2.1б) [119].

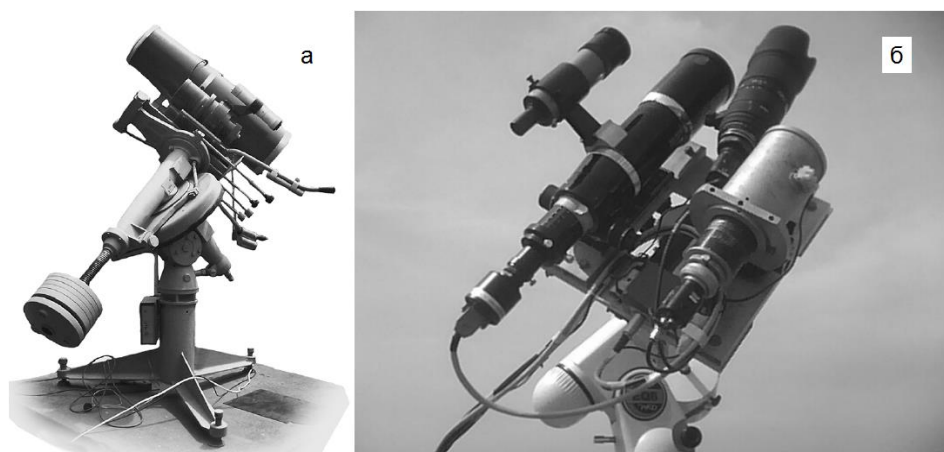


Рис. 2.1. Варіанти компонування метеорних патрулів НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ ім. І.І. Мечникова: (а) – телескоп системи Шмідта на спостережній станції “Крижанівка”; (б) – експедиційний автоматичний метеорний патруль.

Для кожного інструмента створена база даних, що безупинно поповнюється при первинній обробці нових спостережень. На момент роботи автора над дисертацією база даних містить інформацію про метеори, що зареєстровані з 2003 по 2017 рік при безперервному метеорному патрулюванні. Для обробки спостережного матеріалу створений пакет програм [119]. Методика та статистика телевізійних спостережень телескопічних метеорів опублікована в [10, 15, 121].

Як приймач випромінювання застосовується монохромна ССТV-Камера Watec LCL-902K (або аналогічні). Деякі параметри камери: формат ССІR; чутливий елемент – КМОН розміром 1/2 дюйма; загальна кількість пікселів – 795 × 596; розмір осередку – 8,6 × 8,3 мкм. Роздільна здатність

відеокамери більше 570 телевізійних ліній, відношення сигнал/шум більше 46 дБ. При установці на телескоп автоматичне регулювання посилення було відключено. Малі габаритні розміри камери дозволяють помістити її у фокусі телескопа Шмідта без створення додаткового він'єтування. Заявлена в паспортних даних чутливість в 0,00015 люкс при відносному отворі 1:1,4 не перевірялася. Але лише акцентуємо увагу, що камера може реєструвати у фокусі телескопа Шмідта зірки до $+13^m$ у системі V. Для оцифрування аналогового сигналу з камери застосовується телевізійний тюнер з восьмирозрядним АЦП, як програмне забезпечення для захоплення відеозображення використовується автоматичний реєстратор метеорів *UFOCapture*⁽⁶⁾. Часова прив'язка комп'ютера здійснюється за допомогою модуля GPS. Запис зображення проводиться із включеним годинним приводом. У телескопічній системі поле зору півдуюмової камери становить $36' \times 48'$. Розмір одиничного пікселя (при фізичному розмірі пікселя згідно паспортним даним 8,3 - 8,6 мкм) у кутовій мері становить 3,8". У результаті ряду експериментів за участю автора дисертації було визначено, що система може працювати у двох режимах. Як відомо, у телевізійному сигналі отримується 625 рядків (з них 576 з відеоінформацією) і відображаються послідовно 2 напівкадри, що складаються з парних рядків (парний напівкадр) і непарних рядків (непарний напівкадр). Така організація введення зображення для об'єкта, що рухається, має наступний недолік: при аналізі не можна використовувати роздільну здатність по одній з координат більше, ніж число рядків в одному напівкадрі. Перший режим дає можливість зчитувати один напівкадр протягом 20 мс і потім протягом "мертвого" часу 20 мс зображення не буде. Другий режим дозволяє зчитувати й парний, і непарний напівкадр за кожні 20 мс і не мати мертвого часу. Слід зазначити, що для планування метеорного патрулювання цікавили обидва режими. Зображення метеорів, отримані першим способом, являють собою переривчасті штрихи,

⁶ Програмне забезпечення Sonotaco (Японія) у відкритому доступі
http://sonotaco.com/soft/e_index.html

причому довжина перерви приблизно дорівнює довжині штриха. При другому способі зчитування перерв між штрихами немає, але варто враховувати, що оскільки перша частина штриха отримана по парних рядках, а друга по непарних, а за час зчитування метеор зміщається, зображення має смугастий вигляд, а для яскравих метеорів проявляється в тім, що посередині метеорного штриха видна зіркоподібна точка. Ця точка має інструментальне походження (більш докладно про цей ефект піде мова в параграфі 3.5). Розглянемо режим зчитування, коли система має “мертвий” час. Що нам дає такий режим? Поряд з одержанням позиційних спостережень метеорів безсумнівний інтерес представляють явища, що відбуваються після прольоту метеора. При наявності мертвого часу ми можемо розділити ці явища. При обробці це дозволяє при зчитуванні й відображенні як парного, так і непарного кадру одержати більше точок, а значить підвищити якість позиційних вимірювань. Але в такому випадку зображення метеора просто накладається на зображення післясвітіння метеора. Програмно відокремивши, парні й непарні напівкадри можна одержати зображення метеора й післясвітіння, отже, такий режим більше раціональний.

Таким чином, комплекс метеорного патруля призначений для фіксації метеорів, які перебувають у полі зору долі секунд. Визначення кінематичних, динамічних і фотометричних характеристик таких швидкоминучих астрономічних явищ пред'являє до приймальної апаратури особливі вимоги. Ці вимоги потребують необхідність проведення ряду експериментів для детального вивчення характеристик приймальної апаратури.

У першу чергу була визначена така важлива характеристика ССТV-камери, як залежність чутливості від довжини хвилі зареєстрованого випромінювання. Для цих цілей була зібрана експериментальна установка на основі спектрофотометра СФ-16, де замість штатного фотоприймача була встановлена ССТV-камера WAT-902K. У результаті вимірювань з'ясувалося (рис. 2.2), що камера чутлива до випромінювання на діапазоні від 400 нм і її

чутливість різко збільшується до максимального значення в районі 700 нм, де є плато до 950 нм. Потім чутливість камери різко падає до 1200 нм.

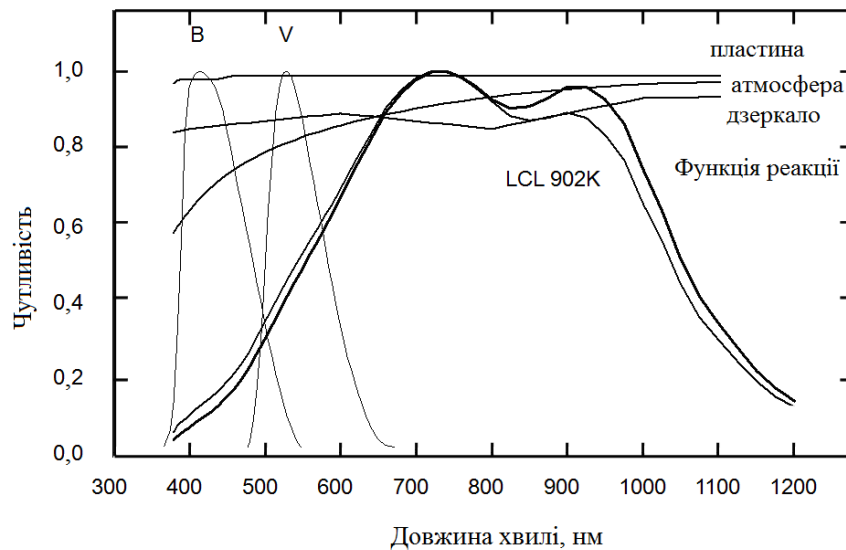


Рис. 2.2. Залежність чутливості від довжини хвилі для SSTV камери Watec LCL-902K.

Для перевірки вірогідності отриманих результатів виникає необхідність у визначенні фактичного значення частоти кадрів, а також дослідженні її стабільності. Для цих цілей був виготовлений прилад, що умовно назвемо його перетворювач “Звук-Світло”. Перетворювач являє собою інтегральний компаратор, вихід якого навантажений на світлодіод, установлений у коліматорі з метою контролю частотних параметрів SSTV-камери. Поріг спрацьовування компаратора (2мВ) забезпечує перетворення вхідного аудіосигналу обраної частоти в прямокутні імпульси струму світлодіоду. Для формування фронту і плато імпульсу застосований вхідний RC-ланцюг із заданими параметрами. За допомогою такого приладу генерується звуковий сигнал із заданою частотою й, перетворивши його у світловий сигнал, реєструється за допомогою робочої камери. Згенерований звуковий сигнал при перетворенні спотворюється, але маємо можливість записувати вже змінений сигнал. У ході експерименту генеруємо сигнал будь-якої тривалості від 35 до 45 мс^{-1} з кроком 1 мс^{-1} . На рис. 2.3а представлений характерний вид генерованого сигналу.

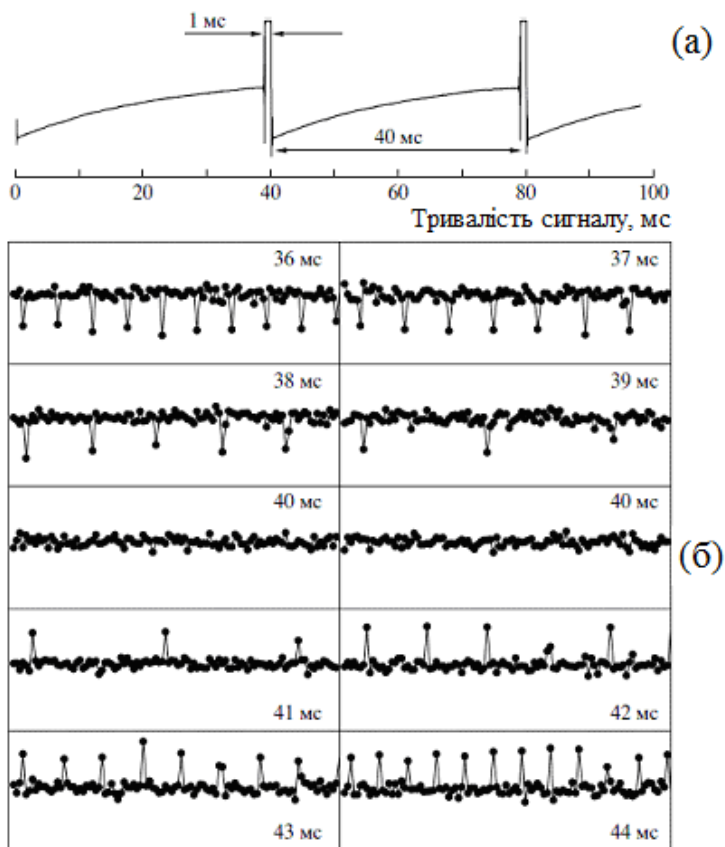


Рис. 2.3. (а) – характерний вид згенерованого сигналу для тестування КМОН-приймача (WATEC LCL-902K); (б) – результати експерименту по визначенню частоти зміни кадрів у КМОН-приймачі (250 точок за 10 сек, для кожного графіка зазначена тривалість генерованого сигналу).

Обробка даних експерименту показала, що дотримується стабільність періодичності зміни кадрів з точністю $0,05 \text{ мс}^{-1}$, стабільність інтенсивності сигналу не гірше 6%. Потім сигнал перетворюється у світлові спалахи й фіксується приймальною апаратурою (телескоп + камера + тюнер). Зафіксований камерою сигнал записується, і після обробки одержуємо середнє значення інтенсивності сигналу по полю. Таким чином, для кожної згенерованої частоти одержуємо часовий ряд значень інтенсивності. Результати експерименту представлені на рис. 2.3б. Як і слід було сподіватися, при розбіжності частоти згенерованого сигналу й частоти прийому камери спостерігаються викиди значень інтенсивності. Таких значень тим більше, чим більше різниця в частоті згенерованого сигналу й частоті приймальної апаратури. І лише коли частоти співпадуть, викиди

точок у часовому ряді припиняться. Згідно рис. 2.3б, такі викиди припиняються при 40 мс^{-1} . Був також проведений повторний експеримент, із періодами від $39,5$ до $40,5 \text{ мс}^{-1}$ та кроком $0,1 \text{ мс}^{-1}$. Навіть із таким малим кроком дотримується аналогічна картина. Таким чином, періодичність зміни кадрів становить 40 мс^{-1} з точністю не гірше $0,1 \text{ мс}^{-1}$.

2.2. Спостережний матеріал.

За період спостережень 2003 - 2017 рр. у Крижанівці (Одеса, Україна) база даних містить порядку 11000 відеофайлів з метеорами. У цій роботі представлені результати визначення кінематичних параметрів метеорних тіл за базисними спостереженнями за участю автора в серпні 2010 і 2011 роках у Крижанівці та острові Зміїний (Одеська обл.) [13] у рамках наукових тем НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова. Під час експедицій на острів Зміїний, основним завданням було спостереження метеорів у серпні місяці. Також відпрацьовувалися методики спостережень за допомогою довгофокусних об’єктивів (140 мм і більше) на відстанях порядку 150 км між метеорними патрулями. Спостереження проводилися практично в ідеальних для метеорного патрулювання астрономічних умовах – переважно безхмарної погоди, відсутності запиленості й антропогенної засвітки неба. Часова прив’язка метеорних патрулів здійснювалася за рахунок GPS-датчиків. За допомогою GPS визначалися геодезичні координати пунктів спостережень: “Крижанівка” – широта місця $\varphi = 46^{\circ} 33' 38",62 \text{ N}$, довгота місця $\lambda = 30^{\circ} 48' 23",56 \text{ E}$, висота місця над рівнем моря 38 м; “острів Зміїний” – широта місця $\varphi = 45^{\circ} 15' 11",80 \text{ N}$, довгота місця $\lambda = 30^{\circ} 12' 7",09 \text{ E}$, висота місця над рівнем моря 8 м. Відстань між пунктами спостережень становить 152,7 км. У табл. 3.1 поміщені оптичні й спостережні характеристики метеорних патрулів, а розгорнутий опис приладів був приведений в розділі 2.1.

Таблиця 3.1

Оптичні та спостережні характеристики метеорних патрулів.

Пункт спостережень	Інструмент (об'єктив)	F, см	Поле зору	Гранична проникнена здатність, m_v	Похибка вимірювання координат	Загальна кількість метеорів	Кількість базисних метеорів
Серпень, 2010							
Крижанівка	Schmidt	54	36'x48'	13,0	1" - 5"	16	1
	KO-140	14	2,5°x2.0°	11,5	3,5" - 5"	52	1
	KP-35	14	2,5°x2.0°	11,5	3,5" - 5"	60	3
острів Зміїний	KO-140	14	2,5°x2.0°	11,5	3,5" - 5"	73	4
Серпень, 2011							
Крижанівка	Schmidt	54	36'x48'	13,0	1" - 5"	31	2
	KO-140	14	2,5°x2.0°	11,5	3,5" - 5"	47	3
	KP-35	14	2,5°x2.0°	11,5	3,5" - 5"	51	5
острів Зміїний	KO-140	14	2,5°x2.0°	11,5	3,5" - 5"	62	6

2.3. Метеорна база даних телескопічних метеорів. Первинна обробка спостережень.

Процедура обробки містить у собі роботу з телевізійними фільмами спостережень і первинну обробку зоряних і метеорних зображень. На наступному етапі проводиться ототожнення ділянок зоряного неба, а потім вимірювання зоряних і метеорних зображень. Кінцевим етапом обробки є одержання високоточних координат точок метеорних траєкторій, їхніх полюсів великих кіл, координат радіантів, кривих блиску метеорів тощо. Методика позиційних вимірювань телевізійних зображень телескопічних метеорів детально викладена в [10].

Після ночі метеорного патрулювання, методика якого докладно викладена в роботі [6], у базу даних надходять відеофільми, що складаються з 50 кадрів до й після метеора та кадрів, власне, із зображенням метеора. Така

процедура робиться за допомогою програмного забезпечення *Avicutter*, що безпосередньо з фільму вирізує кадри з метеорним зображенням, а також створює зображення для парних і непарних рядків кадру.

Додатково проводиться підсумовування 50 кадрів до метеора: для кожної точки прораховується середнє значення інтенсивності за значеннями інтенсивності для тієї ж точки по всім 50 кадрам. Отримане в такий спосіб зображення позначимо як “підсумований” кадр. Підсумовування кадрів дозволяє підвищити проникаючу здатність приблизно до двох зоряних величин. Докладніше про обґрунтування використання 50 кадрів фільму (2 сек) для підсумовування приводиться в роботі [6]. Створені в такий спосіб підсумовані зображення служать для позиційних і фотометричних визначень, хоча для цього придатні й окремі кадри фільму з експозиціями 20 або 40 мс. Окремо для кожного з пікселів зображення обчислюється середнє значення інтенсивності й середньоквадратичне відхилення по всьому ряду з 50 кадрів, що випереджають появу метеора. Надалі ці дані використовуються для обчислення значень фону в точках, де зафіксовано метеорні зображення. Назвемо файли з даними по інтенсивностям фону “картами фону”.

Кожний фільм із зображенням об'єкта ідентифікується за наступними даними в імені: номер об'єкта (відведено 4 знаки), шифр оптичного інструмента встановленого на метеорний патруль, тип об'єкта (метеор, комета, ШСЗ і т.д.), дата у форматі день, місяць, рік. Така ідентифікація дозволяє швидко проводити пошук метеорів у базі даних. Кожний метеор заноситься в загальний каталог.

Для автоматизації вимірювань надто важливо створити динамічну багаторівневу базу даних. Так, структура загального каталогу складена за принципом вкладених папок, наприклад: *D:\Meteor Data Base*, усередині поміщаємо окремо по директоріях з короткими назвами інструментів, за допомогою яких були отримані метеорні зображення *D:\Meteor Data Base\Шмідт*. Далі усередині створюємо директорію *D:\Meteor Data*

Base\Шmidm\Data, де окремо для кожного метеора відповідно до їх нумерації створюються директорії (ім'я кожної директорії повинно бути чотиризначним числом, що позначає номер метеора). У кожній з останніх директорій для конкретного метеора зберігаються файли з інформацією, створеною окремими модулями загального програмного пакета обробки спостережного матеріалу. Крім того, у каталог вноситься назва AVI-фільму, код спостерігача, дата й час початку запису фільму (UTC), зірка гідуння по опорному каталогу (SAO, Tycho-2, Hipparcos або USNO-A2), екваторіальні координати центра зображення й т.д.

Потім проводиться первинна обробка спостережного матеріалу: у фільмі відбираються кадри з метеорними зображеннями, і формується каталог метеорних знімків з нумерацією одиничних кадрів для кожного явища. Поповнюється підсумованими кадрами, також, і каталог зоряних полів. Всі зірки на знімках ототожнюються й нумеруються, а далі вносяться у зведений каталог: назва зоряного каталогу, екваторіальні координати, зоряні величини, показники кольору, спектральний клас та ін. Створені каталоги дозволяють надалі використовувати ці дані для визначення екваторіальних координат і видимих зоряних величин метеорів. У цей час використовується створене за участю автора програмне забезпечення *PSF*, котре дозволяє за номером зірки гідуння з зоряного каталога, який автоматично підключається, проводити оперативне ототожнення зірок на зображенні.

Попередні вимірювання заносяться в базу даних, де зберігаються обмірювані величини метеорів і опорних зірок. Оброблені зображення метеорів накопичуються у фотометричній базі даних. Нижче наведені основні модулі програмного пакета (створених за участю автора дисертації) для попередньої й позиційної обробки спостережного матеріалу.

Для первинної обробки спостережного матеріалу:

1. *Avicutter* – програма для роботи з телевізійними фільмами спостережень і первинної обробки зоряних і метеорних зображень.

2. *Combo* – програма для створення на основі N кадрів комбінованого знімка, що складається з фрагментів із зображеннями метеора в єдиній системі координат.

Для позиційних вимірювань метеорів:

1. *PSF* – програма для ототожнення ділянок зоряного неба. Здійснює позиційну прив'язку до зоряних зображень за методом Тернера.
2. *Picscan* – програма для вимірювань траєкторій телевізійних зображень метеорів.
3. *Meteor Pole* – програма для обчислення полюсів великих кіл метеорних траєкторій.
4. *FROSA* – програма для одержання координат метеорного радіанта методом Станюковича за небазисними спостереженнями.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.

1. Створена й досліджена апаратура для спостереження метеорів з високими часовою й позиційною роздільною здатністю. Як приймач випромінювання застосовується монохромна ССТV-камера фірми Watec: LCL-902K, LCL-902H2 або аналогічні по характеристиках камери. Відеокomплекc чутливий до випромінювання у діапазоні від 400 до 1200 нм (максимальна чутливість 700 нм). Застосовуються світлосильні оптичні системи з фокусними відстанями 85 - 540 мм (телескоп Шмідта). Відеокамера на телескопі Шмідта може реєструвати зірки до $+13^m$ у системі V , метеори до $+10^m$. Періодичність зміни відеокадрів камери становить 40 мс^{-1} з точністю не гірше $0,1 \text{ мс}^{-1}$.

2. Розроблено методику спостережень і первинної обробки отриманого спостережного матеріалу. Методика реалізована у вигляді пакета програмного забезпечення.

3. Проведено за участю автора спостереження метеорів у Крижанівці (Одеса, Україна) та базисні спостереження в серпні 2010 і 2011 роках у Крижанівці та острові Зміїний (Одеська обл.).

4. Створено Одеську базу даних телескопічних метеорних відеоспостережень в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова (більше 11000 метеорів до $+10^m$ за період спостережень 2003 - 2017 рр.).

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ЕЛЕМЕНТІВ ГЕЛІОЦЕНТРИЧНИХ ОРБІТ МЕТЕОРНИХ ТІЛ

У даному розділі описується методика й відповідне програмне забезпечення для розрахунку основних атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів метеорів за спостереженнями із двох віддалених пунктів (з відстанню до ~150 км між кореспондуючими пунктами). Докладно розглянуті в дисертації методики позиційних вимірювань зоряних і метеорних зображень на телевізійному кадрі при спостереженнях у черезстроковому режимі роботи ССТV-камери опубліковані в [10, 15]. Нижче в короткій формі викладені основні положення методик.

Представлені результати обробки спостережного матеріалу отриманого під час базисних спостережень на станції Крижанівка (Одеса, Україна) і острові Зміїний (Одеська обл., Україна) у серпні 2010 і 2011 років. Описується експрес-метод для обробки спостережень болідів у денний час доби, коли класичні методи не придатні для позиційної обробки спостережного матеріалу.

3.1. Позиційні вимірювання зоряних зображень.

Для позиційних вимірювань використовуються опорні зірки з відомими екваторіальними координатами. Точність визначення координат зображення метеорної траєкторії залежить від кількості зірок на зображенні. Кількість опорних зірок на різних зображеннях варіюється, але не менше 10 (найчастіше порядку 30 зірок і більше). Для методу Тернера така кількість опорних зірок цілком прийнятна [71].

Одним з етапів позиційної обробки метеорних зображень є вимірювання прямокутних координат опорних зірок у системі координат знімку. Під час вимірювань зоряного зображення на першому етапі відбувається аналіз зображення й відбір пікселів (точок), що належать зоряному зображенню. Для цього використовуються значення інтенсивності

пікселів фона навколо зображення зірки. Докладно методика щодо визначення рівня фону описана в [6, 10]. Потрібно тільки зауважити, що значення фону становить 110 одиниць при повному діапазоні від 0 до 255 одиниць градації інтенсивності пікселів. Всі точки, які мають значення інтенсивності більше 3σ від рівня фону, відносять до зоряного зображення. Потім для відібраних точок проводиться пошук фотометричного центру кожного зоряного зображення за формулами:

$$X = \frac{\sum(x_i I_i)}{\sum I_i}; Y = \frac{\sum(y_i I_i)}{\sum I_i}, \quad (3.1)$$

де X_i , Y_i - прямокутні координати робочого пікселя, а I_i – інтенсивність пікселя у відносних одиницях. Таким чином, значення прямокутних координат у системі знімка є дробовими, і виникає питання: з якою точністю (у пікселях) вимірюється ці координати? Перевірка точності вимірювання проведена в роботі [10]. Так, стандартне відхилення для координати X становить 0,2, а для координати Y – 0,26.

При фотографічних позиційних вимірюваннях використовують поняття рівняння блиску, що визначається як відносний зсув положень зірок із зображеннями різного розміру на пластинці, викликане різною структурою цих зображень і особливостями їхніх вимірів. Для телевізійних зображень із ПЗЗ-приймачем також існують вимірювання, для яких відхилення досягають значень 0,5 - 1 піксель, і зв'язано це із впливом на точність вимірювань яскравості зоряних зображень. На рис. 3.1а представлена залежність точності визначення координат контрольних зірок від їхніх зоряних величин. Ці дані отримані після обробки ряду знімків з ототожненими опорними зірками методом Тернера [60, 71, 102, 118] з використанням 6 або 12 постійних; потім розраховувались нев'язки для контрольних зірок різної зоряної величини (використовувалися величини в системі V). Як видно з рисунка, для яскравих зірок точність визначення екваторіальних координат залежить від зоряної величини. Зірки яскравіше 6^m є дуже ненадійними для визначення координат

– це пов'язане з більшим розміром зображення зірки; на інтервалі 6^m - 11^m точність визначення координат не гірше $2''$. Для третини зірок слабкіше 11^m похибка визначення координат збільшується, що пов'язано з малим розміром зображення таких зірок і істотних спотворень, що виникають на пікселях матриці. Флуктуації фона також приводять до погіршення точності вимірювань зображень зірок слабкіше 11^m . Тому при виборі опорних зірок при позиційних вимірюваннях зображень, отриманих на інструменті (телескоп Шмідта), варто виключати зірки яскравіше 6^m і вибірково використовувати зірки слабкіше 11^m .

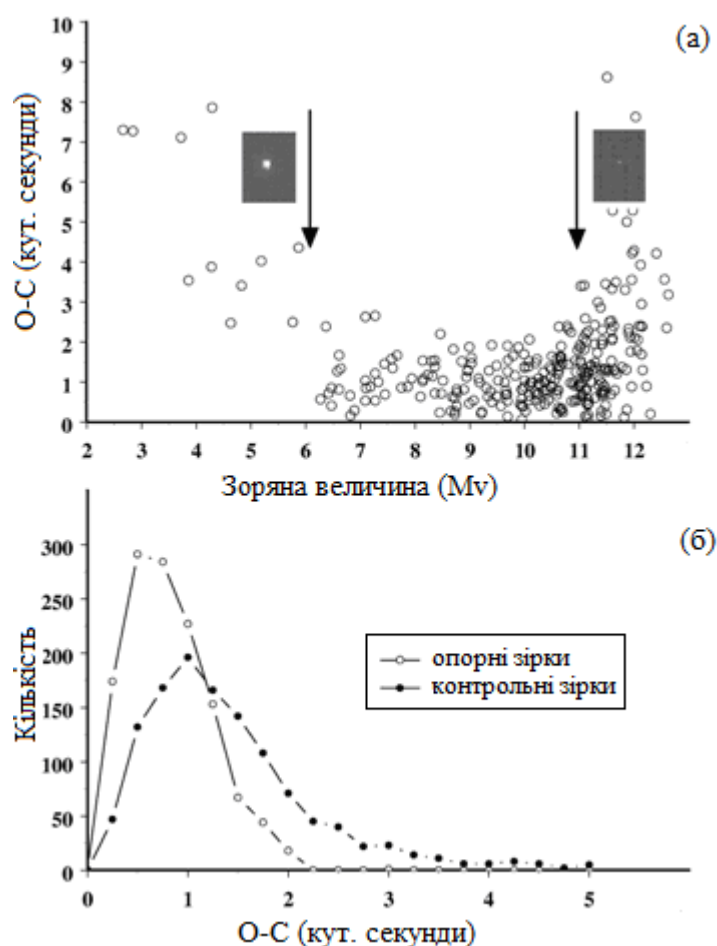


Рис. 3.1. (а) – Графіки залежності точності позиційних вимірювань від яскравості зірок; (б) – розподіл нев'язок для опорних і контрольних зірок.

Для оцінки точності позиційних вимірювань варто використовувати не опорні зірки, нев'язки яких характеризують внутрішню точність методу

Тернера для даної вибірки, а застосовувати контрольні зірки. Такий підхід дозволяє визначити зовнішню точність позиційних вимірювань. Для того щоб одержати точність для реального зображення метеора, що фіксується в певній частині кадру (іноді в куті кадру), використовуються контрольні зірки в цій же області.

На рис. 3.1б представлені полігони розподілів похибок для вибірки опорних і контрольних зірок по 86 знімкам (вибірка 1259 зірок). Для опорних зірок похибки не перевищують 2,0" і мають максимум розподілу 0,7" - 0,8". Максимум розподілу похибок для контрольних зірок зміщений і становить більше 1,0", а діапазон значень збільшується до 5". Таким чином, для кожного телевізійного знімка похибка вимірювання обчислюється по контрольних зірках поблизу зображення метеора й дає уявлення про точність позиційної прив'язки.

3.2. Позиційні вимірювання метеорних зображень.

Метеорні зображення на телевізійних знімках принципово відрізняються від зіркових зображень з точки зору обробки вимірювань. Метеорне зображення, на відміну від зображення зірки, є штрихом певної довжини. Точність вимірювання координат точки на метеорній траєкторії залежить від блиску метеора, дифузності й ширини його зображення.

Для вимірювання положення метеорного зображення попередньо потрібно перейти до системи координат, пов'язаної з поздовжньою віссю зображення метеорного штриха (рис. 3.2а). Для того щоб визначити положення поздовжньої осі метеорного зображення, у нульовому наближенні задається положення й робоча область вручну. Потім проводиться обчислення інтегрального поперечного скану в заданій робочій області (рис. 3.2б). Під інтегральним поперечним сканом мається на увазі масив точок метеорного зображення, спроектованих на перпендикулярну до траєкторії вісь. Щоб уточнити положення поздовжньої осі потрібно провести додаткову фотометрію робочої області. Для цього, по інтегральному поперечному скану

задається границя області по координаті, що перпендикулярна поздовжній осі. Будемо вважати всі точки в межах робочої області приналежними метеорному зображенню та навколосметеорному фону. Така методика дозволяє виділяти зображення як яскравих, так і найбільш слабких метеорів. Потім, уточнена поздовжня вісь обчислюється по робочій області, використовуючи методику середньозважених фотометричних центрів, аналогічно формулі (3.1). Вплив на положення осі фонових значень у робочій області така методика зводить до мінімуму.

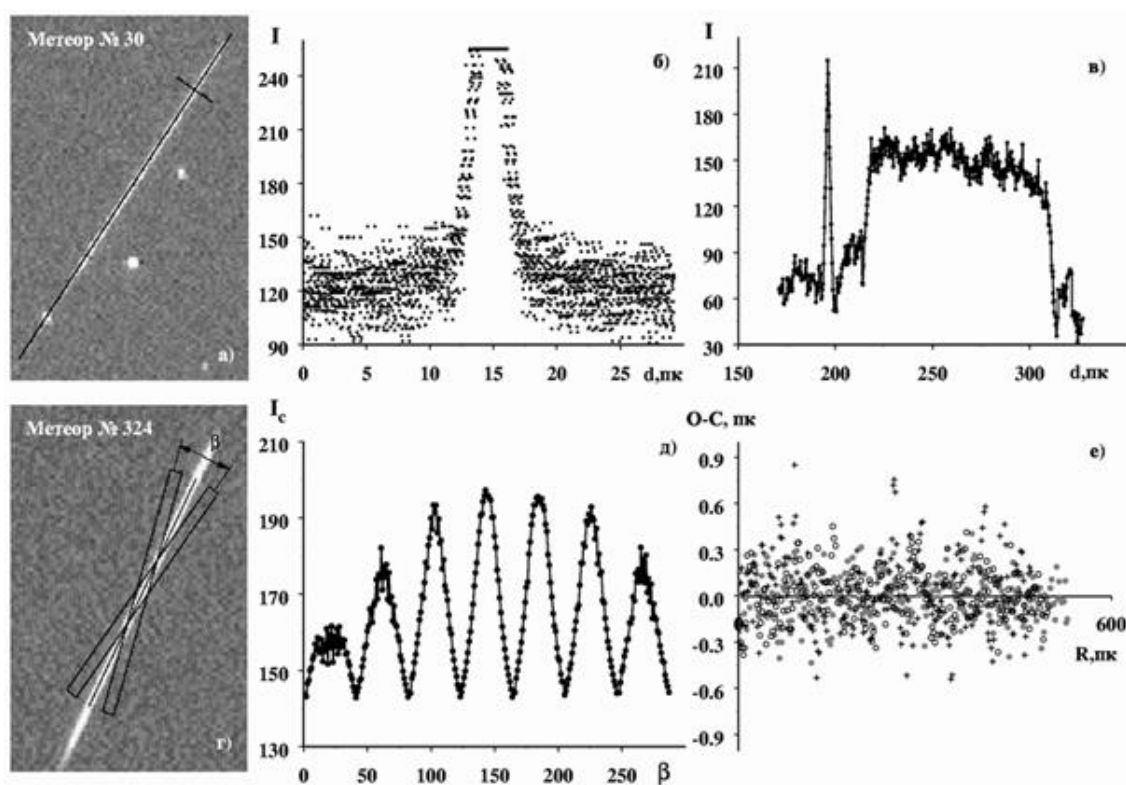


Рис. 3.2. Методика вимірювань траєкторій метеорних зображень: **а)** ручне проведення поздовжньої осі метеорного зображення й робочої області (перше наближення); **б)** обчислення інтегрального поперечного скану; **в)** обчислення поздовжнього скану. Викид у вигляді піка в лівій частині скану належить зображенню зірки (див. рис. 3.2а); **г)** процес визначення поздовжньої осі в напівавтоматичному режимі. Перехід у систему координат, пов'язану з поздовжньою віссю; **д)** залежність середнього значення інтенсивності I_c у робочому вікні від кута повороту β робочої області щодо поздовжньої осі та дискретних зсувів даного вікна в напрямку перпендикулярному поздовжній осі. Максимум відповідає шуканій величині кута β , що вказує на положення поздовжньої осі; **е)** відхилення багаторазово обмірюваних точок від осі.

Крім можливості будувати поперечні скани метеорного зображення, є можливість побудови поздовжніх сканів (рис. 3.2в), що дозволяє виміряти прямокутні координати кінців метеорних штрихів. Великий відсоток метеорів має “хвости”, а в яскравих метеорів і “голова” має складну структуру, що спричиняє невизначеність у вимірюваннях. Аналіз рівня яскравості сигналу для поздовжніх сканів дозволяє перебороти неоднозначність у вимірах прямокутних координат кінців зображень метеорних штрихів і “хвостів”. Якщо зображення метеора попадає на зображення зірки (рис. 3.2в), перекручування координат поздовжньої осі будуть максимальними й тому робочу область вибирають таким чином, щоб зображення зірок у робочу область не попадали.

Процес визначення поздовжньої осі зображення метеорного штриха можна виконувати й у напівавтоматичному режимі. При обробці на зображенні метеорного штриха в нульовому наближенні задається попередня вісь і ширина робочого вікна. Для зручності розрахунків перейдемо в систему координат поздовжньої осі (P, β) . Потім у робочій області перпендикулярно осі з деяким кроком ΔP здійснюється дискретне переміщення. Для кожної такої точки P_i , робоче вікно робить поворот (щодо даної точки) у деякому заданому секторі з кутовим кроком $\Delta\beta$ (рис. 3.2г). Для кожної точки P_i обчислюється середнє значення інтенсивності I_c всіх пікселів, що потрапили в робоче вікно, і одержуємо залежність I_c від кута повороту β (рис. 3.2д). Залежність має максимум, у тому випадку, коли в робоче вікно попадає більше число пікселів, що належать зображенню метеора. Існує таке значення P_i , коли метеорне зображення цілком попадає в робоче вікно і пара значень (P_i, β_{\max}) буде відповідати шуканим значенням. За цими значеннями обчислюються параметри осі, які будуть першим наближенням. Потім, використовуючи нову вісь, здійснюємо переміщення з деяким кроком уздовж осі й для кожної такої точки обчислюємо по формулах (3.1) фотометричний центр заданої околиці метеорного зображення.

Отриманий масив вимірювань зображення метеорного штриха використовується для обчислень параметрів осі зображення для другого наближення. Другого наближення досить для визначення осі із середньоквадратичним відхиленням обмірюваних точок від осі порядку 0,1 пікселя. Але ця величина є внутрішньою похибкою методу, і для того, щоб визначити реальну похибку вимірів, варто багаторазово проміряти зображення метеорного штриха з різними варіаціями розмірів робочого вікна, величин ΔP і $\Delta \beta$.

Крім методики сканування розроблена незалежна методика коректування положення вимірювального вікна й обчислення положення поздовжньої осі метеорного зображення. Основне вимірювальне вікно містить у собі два додаткових, у кожному з яких, визначається поперечний скан зображення метеорної траєкторії на краях штриха. Вимірник, оперуючи величиною додаткових вікон, зсувом і поворотом осі зображення, домагається збігу максимумів поперечних сканів метеорного штриха. Вимірювання зображень метеорних траєкторій з використанням двох незалежних методик відрізняються на величину менше 0,2 пікселя.

Якщо поблизу зображення метеорного штриха присутній “гарячий піксель” або зображення зірки (рис. 3.2а, рис. 3.2в), тоді з масиву вимірювань виключаються прилеглі точки, тому що такі зображення спотворюють фотометричну інформацію про метеорний штрих. Багаторазові тестові виміри показали, що для використовуваних знімків середньоквадратичне відхилення обмірюваних точок від осі зростає до 0,2 пікселя (рис. 3.2е) і відповідає точності, з якої визначаються прямокутні координати зоряних зображень. Величина похибки кута нахилу осі метеорного зображення для яскравих довгих метеорів становить $0,5^\circ$, а для слабких, ледь помітних метеорів досягає значення $1,5^\circ$.

Точність вимірювань залежить від довжини метеорного штриха на знімку, і тому багатокадрові зображення піддаються процедурі комбінування

одиночних знімків. Для цього створюється на основі N кадрів один комбінований знімок, що складається із фрагментів із зображеннями метеора в єдиній системі координат, які вибираються або візуально оператором, або шляхом напівавтоматичного аналізу профілів метеорних зображень на одиночних кадрах. Таким чином, виходить зображення єдиної метеорної траєкторії, що і піддається обробці. Всі описані методики при вимірах метеорних штрихів використовуються залежно від яскравості метеора і якості зображення. Для кожного знімка визначається індивідуальна похибка вимірювань.

3.3. Обчислення координат полюсів великих кіл метеорних траєкторій.

Після обробки метеорного зображення, використовуючи обчислені екваторіальні координати окремих точок на траєкторії, одержуємо координати полюса великого кола метеорної траєкторії. При обчисленні точності визначення сферичних координат полюса великого кола метеорної траєкторії будемо дотримуватися точки зору [49], відповідно до якої похибка σ_p визначається наступним виразом:

$$\sigma_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_m}{\sin \gamma}, \quad (3.2)$$

де γ – кутова довжина метеорного зображення, $\sigma_m = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_t^2}$ – похибка вимірювань координат точок зображення метеорної траєкторії. Похибка вимірювань у нашому випадку визначається, по-перше, точністю вимірювань методом Тернера зоряних зображень σ_T , по-друге, точністю вимірювання зображення метеорної траєкторії σ_t . На рис. 3.3 представлені залежності величини σ_p від кутової довжини γ її спостереженого фрагмента (обидві величини в кутових хвилинах).

Кожна залежність прорахована для певної величини σ_m , величина якої в дугових секундах представлена біля відповідної кривої. Як видно на рис.

3.3, основним фактором, що впливає на точність визначення координат полюса, є величина довжини метеорної траєкторії. Для коротких траєкторій (менше 10') точність визначення становить більше 20' при точності вимірювань траєкторії в 4". Метеорні зображення, які на телевізійних знімках зафіксовані в кутах кадрів і тому мають малі кутові довжини, для цілей визначення координат полюсів малопридатні.

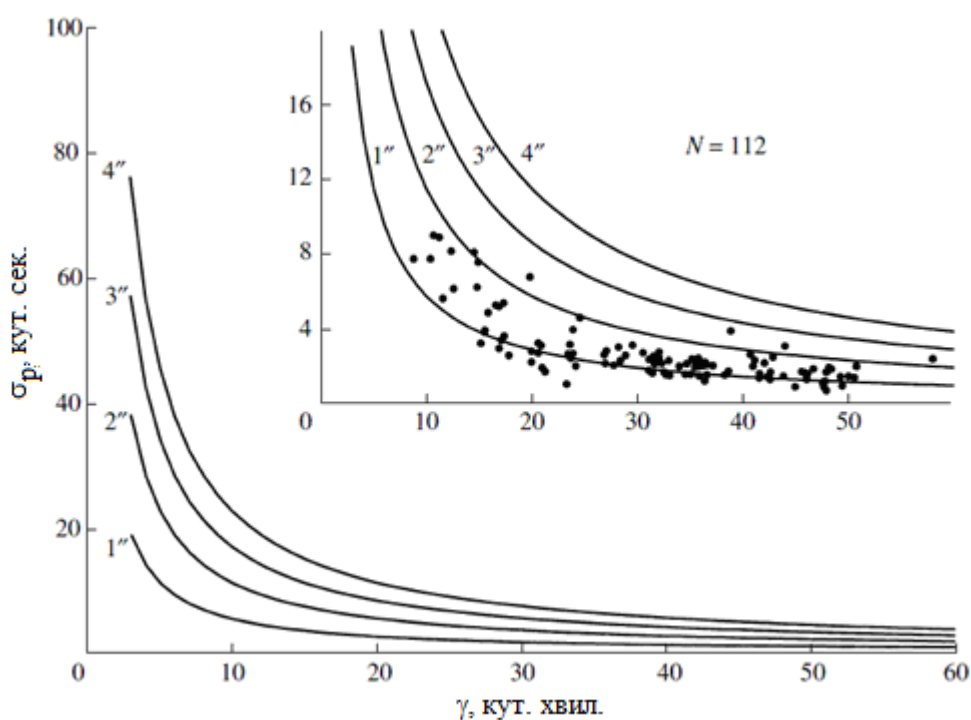


Рис. 3.3. Точність визначення полюсів метеорних траєкторій σ_p залежно від довжини дуги γ і похибок вимірювань σ_m (числа біля теоретичних ліній графіка). Точками (на вставці) показані реальні значення точності визначення полюсів метеорних траєкторій для випадково обраних 112 метеорів.

Кожна із цих компонентів σ_T і σ_t похибки може варіюватися в деякому діапазоні й формувати похибку для вимірювань кожного метеорного зображення. На вставці рис. 3.3, крім теоретичних кривих, при фіксованих значеннях σ_m , приведені точки, обчислені для реальних метеорних зображень по вибірці з 112 метеорів. Цей графік дає уявлення про розподіл похибок вимірювань σ_m , обчислені значення яких лежать у межах 1" - 3", а в деяких вдалих випадках можуть приймати значення менше 1". Як видно на вставці рис. 3.3, якщо для розрахунків координат полюсів використовувати

вимірювання зображень метеорних траєкторій довжиною не менше 15', тоді для спостережених метеорів похибка визначення координат полюса σ_p зображень, навіть для погано вимірюваних зображень із похибкою в 4", складе менше 10'. Для впевнено вимірюваних зображень величина похибки визначення точки метеорної траєкторії становить 1" - 2". Якщо зображення метеорної траєкторії зафіксовано по діагоналі знімка (довжина траєкторії в цьому випадку буде досягати 60'), тоді похибка визначення координат полюса складе близько 3', що є межею для розглянутого метеорного патруля. При спостереженнях, залежно від кутової швидкості метеора й орієнтації траєкторії в кадрі, метеорне зображення може мати від 1 до 12 штрихів. Можливий випадок і стаціонарного метеору, коли все метеорне зображення попадає в кадр. Наприклад, один з метеорів в одеській базі даних відеоспостережень, при довжині в 20' має 27 штрихів. Але стаціонарні метеори досить рідко фіксуються (менше 1% усього спостережного матеріалу).

3.4. Обчислення кінематичних атмосферних параметрів метеорів.

Методикам обчислень кінематичних параметрів метеорів і елементів геліоцентричної орбіти метеороїдів присвячено багато публікацій. Так, методам обробки фотографічних спостережень яскравих метеорів присвячена публікація [101]. Векторний спосіб визначення параметрів траєкторії й елементів геліоцентричної орбіти метеора за телевізійними спостереженнями представлено в [55, 56]. В [124] описано векторний підхід обробки несинхронних телевізійних спостережень, у тому числі, і з урахуванням будь-якої кількості кореспондуючих станцій. В [80, 145] описується програмне забезпечення MOTS (Meteor Orbit and Trajectory Software) для обробки телевізійних спостережень. Визначення орбіт на основі спостережень метеорів з використанням чисельних методів описаний в [110]. Основна частина методики в дисертації реалізована на основі монографії [49] але,

вона використовувалась для фотографічного методу спостережень метеорів із застосуванням обтюратора. Тому, у багатьох випадках необхідно було повністю переглянути і розробити нові методи обчислення або вимірювання деяких параметрів метеорів з урахуванням специфіки роботи спостережної апаратури на основі ССТV камер як приймача випромінювання.

Окрема увага приділена спеціальному випадку, коли відеоспостереження боліда проводяться в денний час доби. У такому випадку, стандартні методи обчислення кінематичних параметрів метеороїда не можуть бути застосовані через відсутність можливості прив'язати траєкторію зображення боліда до зоряного фону. Запропонований спосіб є експрес-методом і буде актуальний у випадку, якщо необхідно швидко й з високою точністю оцінити основні кінематичні параметри явища або коли за якимись причинами інші способи неприйнятні.

Нижче в короткій формі представлені формули для обчислення кінематичних параметрів метеорів за спостереженнями із двох віддалених кореспондуючих пунктів (умовно позначимо їх “А” і “В”). Вхідними параметрами для розрахунку елементів орбіти є:

дата і час метеора в UTC (переводимо час спостереження метеора в частки години UTC);

V_{obs} – спостережувана позаатмосферна швидкість метеороїда ($\text{км} \cdot \text{сек}^{-1}$);

φ – широта місця спостереження (кут. градуси);

λ – довгота місця спостереження (кут. градуси);

α_R – екваторіальні координати видимого радіанта, пряме сходження (кут. градуси);

δ_R – екваторіальні координати видимого радіанта, схилення (кут. градуси);

A_R – азимут видимого радіанта (кут. градуси). У створеному автором програмному забезпеченні використовується астрономічний азимут (відлічується від напрямку на Південь);

h_R – кутова висота видимого радіанта (кут. градуси);

H_{\max} – лінійна висота (км) у точці загорання метеора над земною поверхнею.

Константи еліптичності Землі (необхідні для введення виправлення за еліптичність Землі):

$$R_{POL} = R_{EQ}(1 - f_{const}) \quad (3.3)$$

З урахуванням еліптичності Землі координати пунктів знаходимо згідно:

$$tg\varphi' = (1 - f_{const})^2 tg\varphi \quad (3.4)$$

Слід зазначити, що значення довготи пункту спостереження приймаємо без змін $\lambda' = \lambda$.

Радіус Землі в пунктах спостережень:

$$R_S = \sqrt{\frac{R_{EQ}^2 - R_{POL}^2}{\frac{R_{EQ}}{R_{POL}} tg\varphi'^2 + 1} + R_{POL}^2} \quad (3.5)$$

Прямокутні координати (Грінвіцька земна система координат) пунктів спостережень:

$$X_S = (R_S + h_S) \cos\varphi'_S \cos\vartheta_S \quad (3.6a)$$

$$Y_S = (R_S + h_S) \cos\varphi'_S \sin\vartheta_S \quad (3.6б)$$

$$Z_S = (R_S + h_S) \sin\varphi'_S, \quad (3.6в)$$

де ϑ_S - локальний зоряний час⁽⁷⁾ (кут. градуси), h_S - лінійна висота пункту спостереження над рівнем моря.

Базисна відстань (км) визначаємо по формулі:

$$b = \sqrt{(X_{SA} - X_{SB})^2 + (Y_{SA} - Y_{SB})^2 + (Z_{SA} - Z_{SB})^2} \quad (3.7)$$

⁷ Для зручності розрахунків замість довготи місця будемо використовувати зоряний час в пункті спостереження з даної довготою місця, так як в даному випадку при обчисленнях немає необхідності враховувати знак на "захід" або "схід" від Грінвіча.

Азимути (астрономічні) напрямку з одного пункту спостереження на інший A_{12} і A_{21} знайдемо з виразу:

$$\sin A_{12} = \cos \varphi_2 \frac{\sin(\lambda_1 - \lambda_2)}{\sin \Theta}, \quad (3.8)$$

де

$$\cos \Theta = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (3.9)$$

Проекція напрямку базисної лінії на небесну сферу:

$$\Delta X = X_{SA} - X_{SB} \quad (3.10a)$$

$$\Delta Y = Y_{SA} - Y_{SB} \quad (3.10б)$$

$$\Delta Z = Z_{SA} - Z_{SB} \quad (3.10в)$$

$$\sin \delta_b = -\frac{\Delta Z}{b} \quad (3.10г)$$

$$\cos \alpha_b = \frac{\Delta X}{b \cos \delta_b} \quad (3.10д)$$

$$\sin \alpha_b = \frac{\Delta Y}{b \cos \delta_b} \quad (3.10е)$$

За формулами переходу екваторіальних координат у горизонтальні визначаємо азимут A_b і кутову висоту h_b точки проекції базисної лінії на небесну сферу. Аналогічно, знаходимо діаметрально протилежну точку проекції базисної лінії на небесну сферу δ_b' й α_b' , і відповідні горизонтальні координати – азимут A_b' і кутову висоту h_b' точки.

Траєкторію метеора на небесній сфері можна представити у вигляді дуги великого кола в системі екваторіальних координат. Обчислимо екваторіальні координати (α_p, δ_p) полюса великого кола метеора по координатах вимірних точок метеорного зображення, застосовуючи відомі в метеорній астрономії формули В.В. Каврайського [47]:

$$ctg\alpha_p = \frac{ctg\delta_{11} \sin \alpha_{11} - ctg\delta_{12} \sin \alpha_{12}}{ctg\delta_{11} \cos \alpha_{11} - ctg\delta_{12} \cos \alpha_{12}} \quad (3.11a)$$

$$tg\delta_p = -ctg\delta_{11} \cos(\alpha_p - \alpha_{11}) = -ctg\delta_{12} \cos(\alpha_p - \alpha_{12}) \quad (3.11б)$$

Розрахунок координат (α_p, δ_p) будемо проводити методом найменших квадратів (МНК) аналогічно обчисленням, наведеним нижче (див. формули (3.16a) - (3.20б)).

Всі обмірювані точки метеорного зображення лежать уздовж дуги великого кола на небесній сфері, але з деяким розкидом щодо цього кола. Із цієї причини, для кожної обмірюваної точки метеорного зображення обчислюємо відповідну точку, що лежить у точності на дузі великого кола. Перерахування екваторіальних координат проводимо по формулі:

$$tg\delta_j = -\frac{\cos(\alpha_j - \alpha_p)}{tg\delta_p}, \quad (3.12)$$

де $j=1..n$ номер точки; δ_j і α_j – значення схилення і прямого сходження в екваторіальних координатах точки зображення метеора; α_p і δ_p – екваторіальні сферичні координати полюса великого кола метеорної траєкторії. Дану процедуру застосовуємо для метеорних зображень, отриманих в обох пунктах спостережень “А” і “В”.

По формулах Каврайського обчислюємо координати радіанта метеора, що являє собою точку перетину великих кіл метеора, отриманого із двох базисних пунктів (радіант є полюсом великого кола проведеного через полюси великих кіл метеора, спостережуваного із двох базисних пунктів):

$$ctga_R = \frac{ctg\delta_{PA} \sin \alpha_{PA} - ctg\delta_{PB} \sin \alpha_{PB}}{ctg\delta_{PA} \cos \alpha_{PA} - ctg\delta_{PB} \cos \alpha_{PB}} \quad (3.13a)$$

$$tg\delta_R = -ctg\delta_{PA} \cos(\alpha_R - \alpha_{PA}) = -ctg\delta_{PB} \cos(\alpha_R - \alpha_{PB}) \quad (3.13б)$$

Кут зближення розрахуємо по формулі:

$$\cos Q = \sin \delta_{PA} \sin \delta_{PB} + \cos \delta_{PA} \cos \delta_{PB} \cos(\alpha_{PA} - \alpha_{PB}) \quad (3.14)$$

Похибка у положенні радіанта на небесній сфері знайдемо відповідно до формули:

$$\Delta R = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{(\Delta P_{PA})^2 + (\Delta P_{PB})^2}}{\sin Q}, \quad (3.15a)$$

де погрішності вимірювання полюсів великих кіл метеора [15] для кореспондуючих пунктів спостережень:

$$\Delta P_{PA} = \pm \sqrt{\Delta^2 \delta_{PA} + \Delta^2 \alpha_{PA} \cos^2 \delta_{PA}} \quad (3.15б)$$

$$\Delta P_{PB} = \pm \sqrt{\Delta^2 \delta_{PB} + \Delta^2 \alpha_{PB} \cos^2 \delta_{PB}} \quad (3.15в)$$

Проведемо паралактичне коло через точку проєкції базисної лінії на небесну сферу (α_b, δ_b) і точку з координатами $(\alpha_{jA}, \delta_{jA})$ на великому колі метеора зафіксованого з пункту “А” (рис. 3.4). Паралактичне коло перетинає велике коло метеора зафіксованого з пункту “В” у точці з координатами $(\alpha_{jB}, \delta_{jB})$. Так як, точки з координатами $(\alpha_{jA}, \delta_{jA})$ і $(\alpha_{jB}, \delta_{jB})$ на метеорній траєкторії просторово збігаються, тому умовно назвемо цю точку “одночасною” точкою на метеорі. Обчислимо значення координат точки $(\alpha_{jB}, \delta_{jB})$.

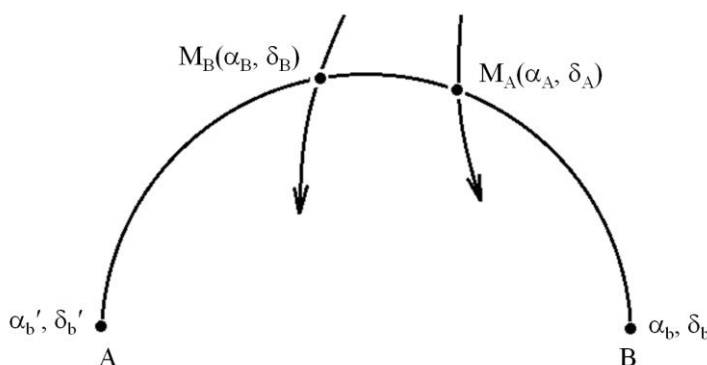


Рис. 3.4. Схема до обчислення “одночасної” точки метеора

Насамперед, визначимо координати полюса паралактичного кола $(\alpha_{par}, \delta_{par})$. Для підвищення точності в обчисленнях задіємо додатково знайдену (3.10а) - (3.10е) точку проєкції на небесну сферу базисної лінії

(α_b', δ_b') . Таким чином, кількість відомих точок, що лежать на паралактичному колі $m = 3$, а розрахунок будемо проводити методом МНК.

Уведемо позначення:

$$\alpha_1 = \alpha_b \quad (3.16a)$$

$$\delta_1 = \delta_b \quad (3.16б)$$

$$\alpha_2 = \alpha_b' \quad (3.16в)$$

$$\delta_2 = \delta_b' \quad (3.16г)$$

$$\alpha_3 = \alpha_{jA} \quad (3.16д)$$

$$\delta_3 = \delta_{jA} \quad (3.16е)$$

Виконаємо нескладні перетворення рівняння системи (3.13б), після чого введемо позначення (скрізь $i = 1 \dots m$):

$$A_i = -\frac{\cos \alpha_i}{\operatorname{tg} \delta_i} \quad (3.17a)$$

$$B_i = \frac{\sin \alpha_i}{\operatorname{tg} \delta_i} \quad (3.17б)$$

У позначеннях Гаусса:

$$[A] = \sum A_i \quad (3.18a)$$

$$[B^2] = \sum B_i^2 \quad (3.18б)$$

$$[B] = \sum B_i \quad (3.18в)$$

$$[BA] = \sum B_i A_i \quad (3.18г)$$

Полос паралактичного кола розраховуємо по формулах:

$$\operatorname{tg} \alpha_{par} = \frac{[A][B] - [BA]m}{[B][B] - [B^2]m} \quad (3.19a)$$

$$\sec \alpha_{par} \operatorname{tg} \delta_{par} = \frac{[A][B^2] - [BA][B]}{m[B^2] - [B][B]} \quad (3.19б)$$

Далі, знаючи координати полюсів великих кіл метеора, знаходимо точку перетинання паралактичного кола з великим колом метеорного зображення пункту “В”. Для цього використовуємо формули Каврайського. У результаті одержимо координати одночасної точки $(\alpha_{jB}, \delta_{jB})$. Ці розрахунки застосуємо для кожної вимірюваної точки $j=1..n$, що лежить на дузі великого кола метеорного зображення в пункті “А”:

$$\operatorname{ctg} \alpha_{jB} = \frac{\operatorname{ctg} \delta_{par} \sin \alpha_{par} - \operatorname{ctg} \delta_{PB} \sin \alpha_{PB}}{\operatorname{ctg} \delta_{par} \cos \alpha_{par} - \operatorname{ctg} \delta_{PB} \cos \alpha_{PB}} \quad (3.20а)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{jB} = -\operatorname{ctg} \delta_{par} \cos(\alpha_{jB} - \alpha_{par}) = -\operatorname{ctg} \delta_{PB} \cos(\alpha_{jB} - \alpha_{PB}) \quad (3.20б)$$

Аналогічно, якщо вважати пункт “В” за основний пункт спостережень, тоді одночасні точки розраховуються для зображення метеора “А”. По формулах переходу екваторіальних координат у горизонтальні знаходимо азимут і кутову висоту точок (A_{jA}, h_{jA}) і (A_{jB}, h_{jB}) для пункту “А” і “В” відповідно.

Далі, визначимо геодезичні координати (λ_0, φ_0) проєкцій одночасних точок метеора на поверхню Землі (умовно назвемо їх “підметеорними точками”). Легко бачити, що значення геодезичних координат підметеорних точок є геодезичними координатами перетину напрямків на них з різних пунктів спостережень. Розглянемо сферичний трикутник на поверхні Землі (рис. 3.5).

У цьому трикутнику нам відомі геодезичні координати двох кореспондуючих пунктів (λ_1, φ_1) і (λ_2, φ_2) , азимути ліній візування на точку (A_{10}) і (A_{20}) . У такому випадку координати точки перетину ліній візування (λ_0, φ_0) визначимо по формулах (3.21а) – (3.24).

$$\alpha = A_{12} - A_{10} \quad (3.21а)$$

$$\beta = A_{20} - A_{21} \quad (3.21\text{б})$$

$$\cos \gamma = \sin \alpha \sin \beta \cos c - \cos \alpha \cos \beta \quad (3.21\text{в})$$

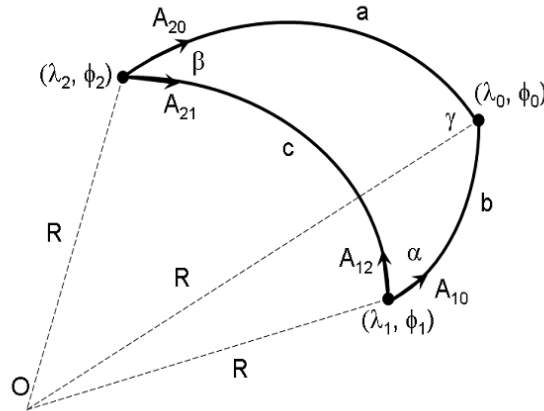


Рис. 3.5. Схема до визначення одночасних точок на поверхні Землі.

Азимуту напрямку з одного пункту спостереження на іншій (A_{12}) і (A_{21}) знайдемо з виразу (3.8).

Сторони сферичного трикутника:

$$\cos a = \frac{\cos \alpha + \cos \beta \cos \gamma}{\sin \beta \sin \gamma} \quad (3.22\text{а})$$

$$\cos b = \frac{\cos \beta + \cos \alpha \cos \gamma}{\sin \alpha \sin \gamma} \quad (3.22\text{б})$$

Геодезична довгота одночасної точки:

$$\tan \lambda_0 = \frac{\sin \lambda_2 z_1 - \sin \lambda_1 z_2}{\cos \lambda_2 z_1 - \cos \lambda_1 z_2}, \quad (3.23\text{а})$$

де

$$z_1 = \sin A_{20} \sin a \quad (3.23\text{б})$$

$$z_2 = \sin A_{10} \sin b \quad (3.23\text{в})$$

Геодезична широта одночасної точки:

$$\cos \varphi_0 = \frac{\sin A_{20} \sin a}{\sin(\lambda_1 - \lambda_0)} = \frac{\sin A_{10} \sin b}{\sin(\lambda_2 - \lambda_0)} \quad (3.24)$$

Як обчислити лінійне значення висоти (H_0) метеороїда над земною поверхнею легко зрозуміти, розглянувши схему на (рис. 3.6), де: A – пункт спостереження, B – проекція точки траєкторії метеороїда D на земну поверхню, h – кутова висота метеороїда, AC – площина горизонту пункту A .

Відповідно до схеми лінійна висота метеорного тіла дорівнює:

$$H_0 = H' + \Delta H \quad (3.25a)$$

Лінійне значення висоти точки метеора над площиною AC :

$$H' = \frac{R_1 \operatorname{tg} \Theta \sin h}{\cos(h + \Theta)} \quad (3.25б)$$

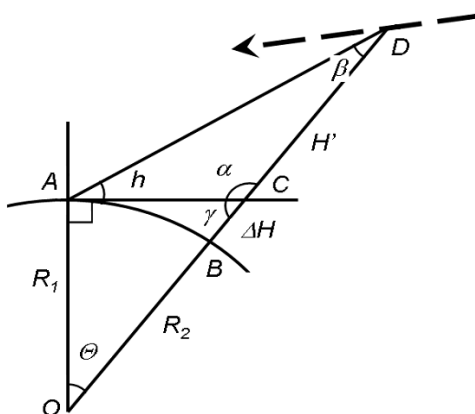


Рис. 3.6. Схема до визначення лінійного значення висоти (H) метеорного тіла (D) над земною поверхнею за відомим значенням кутової висоти метеора видимого з пункту (A).

Поправка (ΔH) за перевищення площини горизонту пункту “ A ” (A , рис. 3.3) над пунктом розташування підметеорної точки (B , рис. 3.6) знайдемо по формулі:

$$\Delta H = \frac{R_1}{\cos \Theta} - R_2 \quad (3.25в)$$

Кут Θ знаходимо з виразу (3.9). Радіуси Землі (R_1 і R_2) у пунктах з відповідними геодезичними координатами з урахуванням стиснення Землі визначимо по формулі (3.5).

Дальність (D) від пункту спостереження до одночасної метеорної точки:

$$D = \sqrt{R_1^2 + (R_2 + H_0)^2 - 2R_1(R_2 + H_0)\cos\Theta} \quad (3.26)$$

Дальність (d) від пункту спостереження до проекції одночасної метеорної точки на поверхню Землі:

$$d = \sqrt{(X_0 - X_S)^2 + (Y_0 - Y_S)^2 + (Z_0 - Z_S)^2}, \quad (3.27)$$

де X_0, Y_0, Z_0 й X_S, Y_S, Z_S – прямокутні координати проекції метеорної точки на поверхню Землі і прямокутні координати пункту спостереження, відповідно, та розраховані по (3.6а) – (3.6в). Аналогічно розраховуються дальності від другого пункту.

Вся видима траєкторія метеора не обов'язково буде одночасно перекриватися полями камер кореспондуючих пунктів. Тому, весь процес розрахунків проводимо окремо для ділянок метеора видимих у кожному пункті, по черзі приймаючи за основний один з пунктів спостережень. У результаті одержуємо два незалежних набори із просторовими параметрами ділянок метеора зафіксованих кожним оптичним комплексом, що дозволяє розрахувати середні значення параметрів по всій спостережуваній траєкторії й оцінити відтворюваність вимірювань просторових параметрів метеора із двох пунктів окремо. Для цього знайдемо аналітичну залежність $(H_j, \varphi_j, \lambda_j)$ від однієї зі сферичних координат, наприклад, прямого сходження α_j . Попередній аналіз показав, що в цьому випадку, найкраще апроксимацію проводити квадратичною залежністю виду $y = ax^2 + bx + c$. Обчислимо середні значення висот і географічних координат $(H_j, \varphi_j, \lambda_j)$ кожної із точок метеора з координатами (α_j, δ_j) , використовуючи отримані квадратичні залежності.

Таким чином, маємо просторові координати одночасних точок $(H_j, \varphi_j, \lambda_j)$ – лінійна висота (км), геодезична широта й довгота відповідно, а також дальності D_j й d_j (км) до метеорних і підметеорних точок від пунктів спостережень.

Відтворюваність результатів вимірювань геометричних параметрів (лінійна висота, дальність, проекція траєкторії метеора на земну поверхню) атмосферних траєкторій із двох кореспондуючих пунктів, можна оцінити по різниці відповідних величин отриманих у цих пунктах окремо. Для метеорів, зафіксованих у Крижанівці та на острові Зміїний у серпні 2010 і 2011 роках, такі різниці наведені в додатку (табл. А). Так, відтворюваність результатів обчислення геодезичних координат підметеорних точок по вимірах окремо в кожному пункті спостережень по довготі ($\Delta\lambda$) і широті ($\Delta\varphi$) становить порядку 1" і менше. На поверхні Землі в місці розташування метеорних патрулів у лінійному масштабі 1" дорівнює відстані приблизно 20 і 30 метрів по довготі й широті, відповідно. Відтворюваність обчислених лінійних висот метеорів над земною поверхнею в середньому менше 100 метрів (у таблиці зазначені максимальні й мінімальні значення). Попередній аналіз джерел похибок і їхніх величин показав, що при вдалому розташуванні метеорної траєкторії щодо кореспондуючих пунктів спостережень для зафіксованих оптичними системами загальних ділянок траєкторії метеора лінійні висоти визначаються з відтворюваністю в значеннях порядку 0,01 м (метеор № 7, у додатку табл. А). У протилежному випадку, відтворюваність у значеннях можуть досягати сотень метрів. На прикладі метеорів № 6 і №7 (додаток, табл. А) видно, що обчислення лінійних висот метеорів для різних оптичних інструментів приблизно однакові.

3.5. Обчислення атмосферної швидкості метеорних тіл.

Під час спостережень використовувався черезрядковий (англ. Interlace) режим роботи відеокамери. Кадр з черезрядковим розгорненням складається

із двох телевізійних полів (напівкадрів), зміщених у часі відносно один одного. Модельний ряд відеокамер LCL-902H2 і LCL-902K працюють у режимі 25 кадрів у секунду, тобто кожне з полів формується за 0,02 секунди. За цей час, об'єкт що швидко рухається встигає зміститися настільки, що зсув напівкадрів один відносно одного створює подвійний силует об'єкта – один з непарних, а інший з парних рядків кадру (рис. 3.7а). Це прояв так званого ефекту черезрядкової “гребінки”. На рис. 3.7б і рис. 3.8а (позначено білою стрілкою) представлено прояв даного ефекту для метеороного зображення. Умовно позначимо дане місце стикування як “точка зупинки” зображення рухливого об'єкта. Точка зупинки має важливу властивість для наших подальших цілей. Дійсно, відносний зсув у часі між точками зупинки двох наступних сусідніх кадрів з високою точністю визначається періодичністю роботи відеокамери (тобто в нашому випадку використовуються CCTV камери з $\Delta t = 0,04$ сек). З іншого боку, зазначені точки однозначно визначаються по координатах, тобто, існує можливість обчислити пройдений шлях (S) метеора за час Δt між ними в атмосферному просторі. Таким чином, потрібно визначити два необхідних параметри для обчислення середньої атмосферної швидкості метеора. Нижче приводиться методика й особливості пошуку даних параметрів.

Кожна точка зображення метеора характеризується координатами в системі зображення (X, Y) і яскравістю пікселя (I). Всі точки метеора з координатами (X_j, Y_j) , де $j=1...n$ номер точки в масиві, отриманих у результаті вимірювань метеорних зображень, можна апроксимувати прямою лінією у вигляді $y = kx + b$.

Для зручності створимо нову шкалу (R) уздовж цієї прямої (рис. 3.8а), у цьому випадку кожна точка метеора буде мати координати: $R_j(X_j, Y_j)$. Початком системи відліку для визначеності будемо вважати першу крайню ліву точку на зображенні метеора:

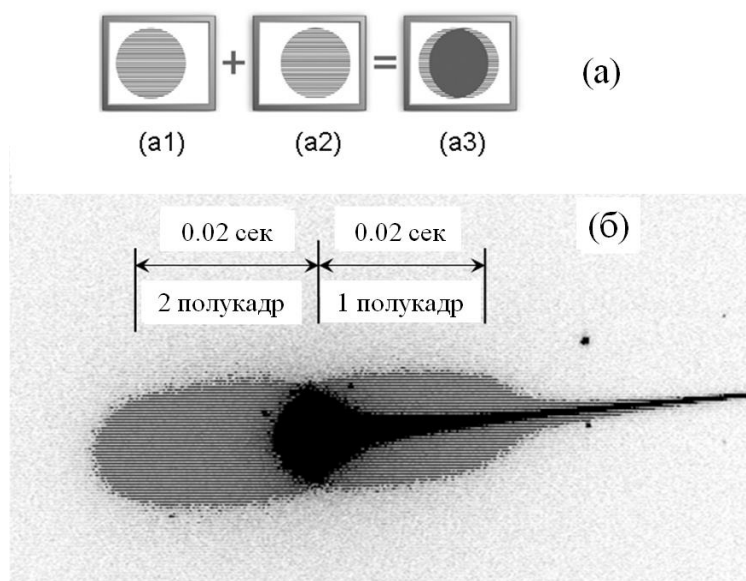


Рис. 3.7. Черезрядкове розгорнення (interlace): (a1) і (a2) – зображення на напівкадрах з парними й непарними рядками; (a3) – зупинка кадру або точки, що рухається, у черезрядковому розгорненні; (б) – зображення яскравого телескопічного метеора у черезрядковому розгорненні ($25 \text{ кадрів} \cdot \text{сек}^{-1}$).

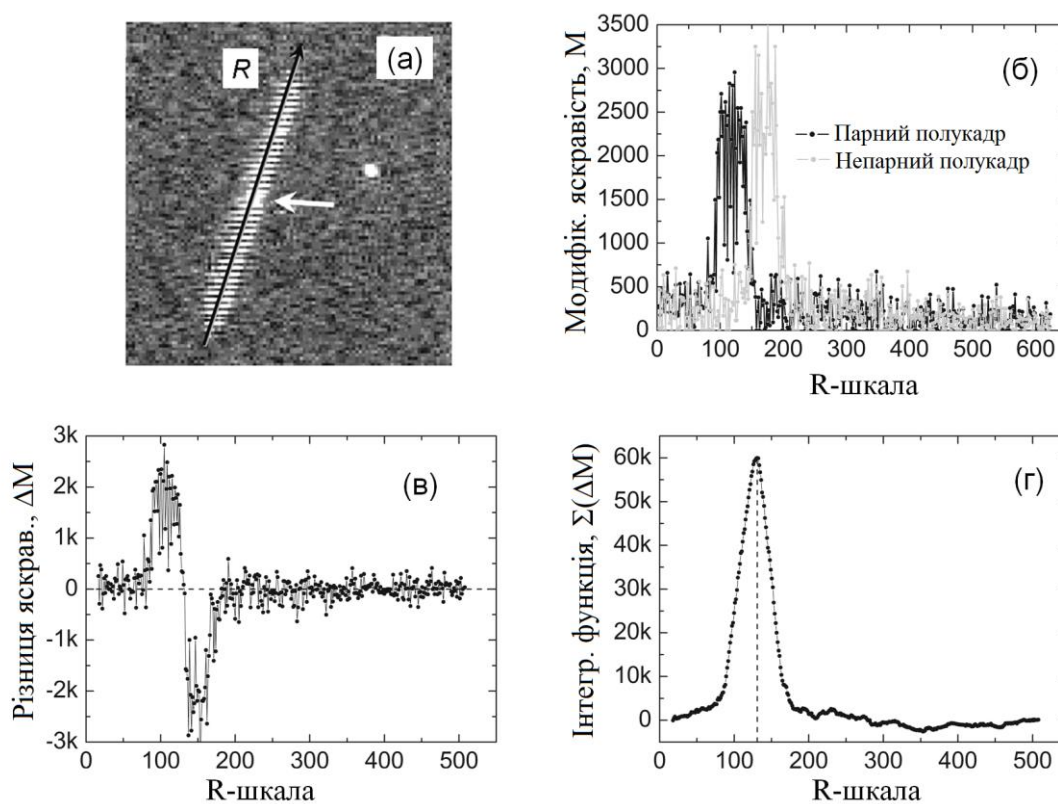


Рис. 3.8. До методики пошуку координат “точки зупинки” метеорного зображення у черезрядковому розгорненні.

$$\begin{aligned} X_{\min} &= X_1 \\ Y_{\min} &= Y_1 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Тоді координата кожної точки в новій системі координат буде:

$$R_j = \sqrt{(X_j - X_{\min})^2 + (Y_j - Y_{\min})^2} \quad (3.29)$$

У результаті попередньої обробки відео з метеором маємо набір кадрів (рис. 3.9): інтегральне зображення (Int) - результат підсумовування кадрів до появи метеора; комбіноване зображення (Comb) - результат підсумовування кадрів з метеором; вихідний кадр із зображенням метеора; парний і непарний напівкадри (поля) з метеором.

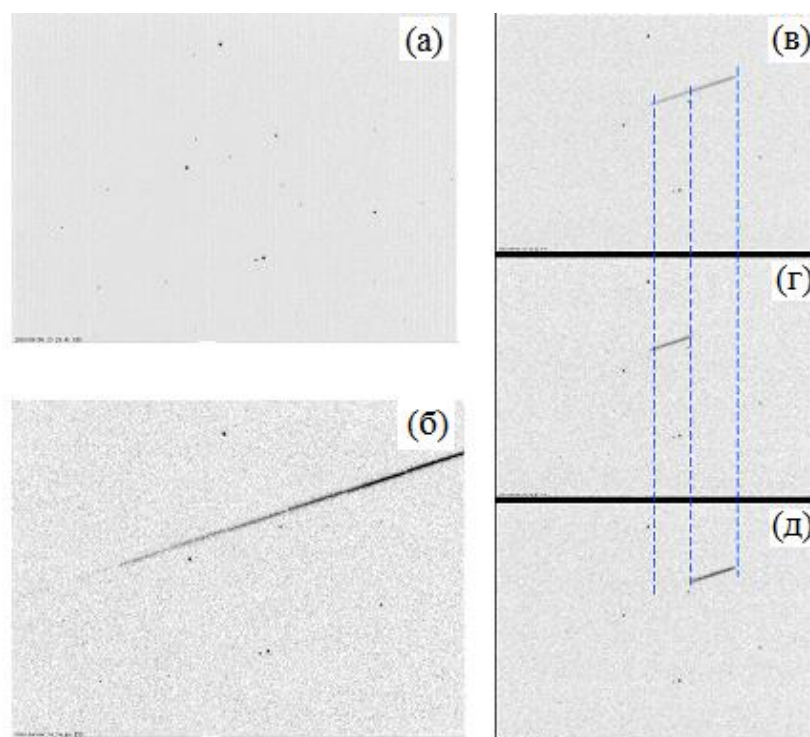


Рис. 3.9. Результат попередньої обробки відео з метеором, набір перетворених кадрів: (а) – інтегральний (Int) до появи метеора; (б) – комбінований (comb) з метеором; (в) – вихідний кадр із метеором (“11”), 40 мс; (г) і (д) – парний (“01”) і непарний (“10”) напівкадри, 20 мс.

На зображення метеора уздовж прямої лінії накладаються зображення зірок фону або дефекти у вигляді аномально яскравих пікселів. Введемо ваговий коефіцієнт що дозволяє врахувати фотометричний вплив цих об'єктів на зображення метеора. Як правило, зазначені перешкоди постійно присутні

кадр від кадру, у той час як метеорне зображення в даному місці присутнє тільки на одному кадрі або яскравість післясвітіння відрізняється від яскравості “тіла” метеора або фону. Таким чином, ваговий коефіцієнт визначимо як відношення яскравості пікселя на комбінованому зображенні з метеором до яскравості даного пікселя на інтегральному зображенні, тобто $\left(\frac{I_{comb}}{I_{int}}\right)$. Множенням вагового коефіцієнта на яскравість пікселя (I_f) метеорного зображення на досліджуваному кадрі одержимо модифіковану величину яскравості пікселя (M_g), виправлену за зазначений ефект. Таку процедуру проробляємо для кожного пікселя уздовж шкали R (окремо для парних і непарних полів) (рис. 3.8б):

$$M_{g(R)} = I_{f(R)} \frac{I_{comb(R)}}{I_{int(R)}}, \quad (3.30)$$

де $g = 01$ або $g = 10$ – вказує на парність поля.

Знайдемо інтегральну функцію ΣM_g уздовж всієї шкали R (окремо для парних і непарних полів):

$$\Sigma M_{g(R)} = \Sigma M_{g(R-1)} + M_{g(R)} \quad (3.31)$$

Обчислимо різницю інтегральної функції (рис. 3.8в) парного і непарного полів:

$$\Delta M_{(R)} = \Sigma M_{01(R)} - \Sigma M_{10(R)} \quad (3.32)$$

Побудуємо інтегральну функцію $\Sigma \Delta M_{(R)}$ цих різниць (рис. 3.8г). Максимальне значення інтегральної функції із цих різниць має R-координату точки перекриття метеорного зображення парного й непарного полів (тобто координати “точки зупинки”, мова про яку йшла вище). По координаті R відновлюємо прямокутні координати (X_k, Y_k) цієї точки в системі зображення. Методом Тернера для кожної точки (X_k, Y_k) обчислюємо їхні екваторіальні координати (α_k, δ_k), а по формулах переходу – горизонтальні координати

(A_k, h_k) цих точок. Скрізь, індекс $k=1...K$ вказує на номер кадру із зображенням вимірюваного метеора.

Обчислимо лінійні висоти (H_k), географічні координати (φ_k, λ_k) кожної із точок метеора з координатами (α_k, δ_k), їхні просторові дальності (D_k) і (d_k) від кореспондуючих спостережних пунктів по описаній вище методиці пошуку зазначених параметрів. Наприклад, у табл. 3.2а наведені значення основних астрометричних і геометричних параметрів одного базисного метеора зафіксованого під час метеорної експедиції в 2010 році на о. Зміїний і спостережним комплексом, що розташований у Крижанівці.

Таблиця 3.2а.

Видиме й просторове положення метеорного тіла (№ 1 табл. А, В1, В2 у додатку), Крижанівка № 0326 і о. Зміїний № 0001.

Пункт спостереження (метеор)	№ кадру	Екваторіальні координати точки метеора		Горизонтальні координати точки метеора		Дальність до підметеорної точки	Дальність до метеора	Лінійна висота
		α (°)	δ (°)	A, (°)	h, (°)	d, (км)	D, (км)	H, (км)
Крижанівка (№0326)	49	4,6341	31,6477	300,4309	66,2824	44,79	113,18	103,70
	50	4,1624	31,0690	302,1428	66,1396	44,30	111,26	101,83
	51	3,6848	30,4740	303,8764	65,9739	43,84	109,38	99,97
о. Зміїний (№ 0001)	49	76,6751	61,2956	215,9743	35,7021	163,00	204,57	121,93
	50	77,1297	61,2933	215,8395	35,5133	161,61	202,29	120,02
	51	77,5842	61,2895	215,7053	35,3243	160,25	200,06	118,15
	52	78,0384	61,2842	215,5718	35,1352	158,93	197,88	116,32
	53	78,4925	61,2773	215,4389	34,9460	157,62	195,75	114,53
	54	78,9462	61,2690	215,3066	34,7566	156,35	193,67	112,78
	55	79,4752	61,2573	215,1531	34,5356	154,90	191,30	110,78

Далі, знайдемо пройдений метеором шлях (S) між двома сусідніми точками зупинки у просторі. Для цих точок вище ми визначили географічні

координати підметеорних точок φ_k, λ_k і $\varphi_{k+1}, \lambda_{k+1}$. Застосуємо тригонометричну формулу знаходження сторони трикутника по двох інших сторонах і куту між ними:

$$S = \sqrt{(R_1 + H_1)^2 + (R_2 + H_2)^2 - 2(R_1 + H_1)(R_2 + H_2)\cos\Theta}, \quad (3.33)$$

де кут Θ визначається відповідно до формули (3.9), H_1 і H_2 - лінійні висоти метеора у відповідних геодезичних пунктах. Радіуси Землі R_1 й R_2 у підметеорних точках знайдемо, застосувавши формулу (3.5).

Остаточно, середня швидкість метеора на даній ділянці атмосферної траєкторії:

$$V = \frac{S}{\Delta t}, \quad (3.34)$$

де Δt інтервал часу між обчисленими точками.

Вище, для визначеності було зазначено, що час формування кадру становить $\Delta t = 0,04$ сек. Але попередній аналіз показав, що даний часовий інтервал має трохи інше значення. Дійсно, час створення кадру погоджене з GPS-приймачем відображається на кадрі, тому можна визначити інтервал часу Δt між будь-якими сусідніми кадрами. Для прикладу, в (табл. 3.2б) наведені два значення інтервалу часу між сусідніми кадрами: Δt_1 - обчислені по різниці відображеного часу послідовних кадрів і $\Delta t_2 = 0,039$ сек – середня величина, розрахована за всіма значеннями Δt_1 відеофайлу.

Легко бачити, що кожний зі спостережних інструментів мають два варіанти значень Δt_1 (0,032 і 0,046 сек у Крижанівці та 0,031 і 0,047 сек на острові Зміїний), що впливає на обчислені по них значеннях швидкостей (V_1). Так, відзначається сильний розкид у значеннях середніх атмосферних швидкостей. До того ж, деякі значення обчислених швидкостей виходять неправдоподібно завищеними або заниженими. Графічно цей результат представлений на рис. 3.10 (порожні точки). У табл. 3.2б приводяться значення атмосферних швидкостей метеора (V_2), обчислених з

використанням середніх значень Δt_2 . Як бачимо, у цьому випадку ми одержуємо “реальні” значення в атмосферних швидкостях метеора (на рис. 3.10, темні точки). Таким чином, для розрахунку необхідно застосовувати значення $\Delta t = \Delta t_2 = 0,039$ сек, а не 0,04 сек або Δt_1 .

Таблиця 3.26.

Розрахунок атмосферної швидкості метеорного тіла (№ 1 табл. А, В1, В2 у додатку), Крижанівка № 0326 і о. Зміїний № 0001.

Пункт спостереження (№ метеору)	№ кадру	Час кадру, UT [23 ^{год} 29 ^м] (сек)	Δt_1 (сек)	Δt_2 (сек)	H_{cp} (км)	S (км)	V_1 (км·сек ⁻¹)	V_2 (км·сек ⁻¹)
Крижанівка (№ 0326)	49	42,125	0,046	0,039	102,76	2,36	51,34	60,56
	50	42,171	0,032	0,039	100,90	2,34	73,13	60,00
	51	42,203						
о. Зміїний (№ 0001)	49	42,498	0,031	0,039	120,98	2,41	77,81	61,85
	50	42,529	0,047	0,039	119,09	2,36	50,19	60,49
	51	42,576	0,031	0,039	117,24	2,31	74,44	59,17
	52	42,607	0,047	0,039	115,43	2,26	48,04	57,89
	53	42,654	0,047	0,039	113,66	2,21	47,01	56,66
	54	42,701	0,031	0,039	111,78	2,52	81,26	64,59
	55	42,732						

Причина озвученої невідповідності викликана специфікою формування зображення в черезрядковому режимі роботи відеокамери. У реальній ситуації на електронному рівні відбувається порушення ідентичності моментів запуску розгорнення по полях при черезрядковому розгорненню. Тому час формування парних і не парних полів трохи різні й не дорівнюють 0,02 сек (але сума часу формування полів обох парностей дорівнює часу формування повноцінного кадру й становить 0,039 сек). Зазначену особливість необхідно враховувати при розрахунку значень швидкості

метеора за спостереженнями з використанням CCTV камер типу WATEC LCL - 902.

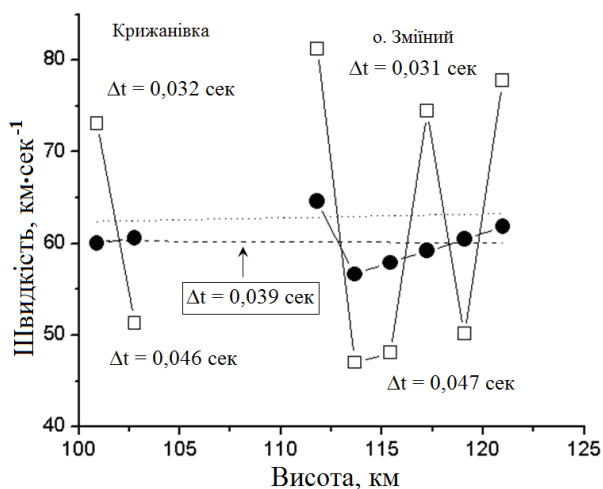


Рис. 3.10. Обчислена швидкість метеорної частки (табл. 3.3а, б) залежно від висоти над поверхнею Землі. Вплив застосовуваного інтервалу часу (Δt) між наступними кадрами на значення обчисленої швидкості.

Через відносну далекість спостережної апаратури немає можливості синхронізувати час кадрів відеофайлу з метеором у пунктах “А” і “В”. Тому, розрахунок атмосферної швидкості проводимо окремо для метеорного зображення, отриманого в пунктах “А” і “В”. Після чого, аналізуються графіки швидкості як функції відповідних географічних координат або висоти (тобто, у такому випадку, з’являється можливість розглядати зміну швидкості метеорного тіла в атмосфері в сукупності за спостереженнями в пунктах “А” і “В”).

Надалі, для обчислення геліоцентричних елементів орбіти метеороїда, визначаємо його позаатмосферну швидкість (V_{∞}). У наших розрахунках використовується часто застосовувана в метеорній астрономії емпірична залежність пройденого метеороїдом шляху (S) від часу (t):

$$S = a + bt + ce^{kt}, \quad (3.35)$$

де a , b , c , k - постійні, $e = 2,718$.

У такому випадку, швидкість:

$$V = \frac{ds}{dt} = b + kce^{kt} \quad (3.36)$$

Помітимо, що постійна $b = V_\infty$ при $t \rightarrow -\infty$.

Гальмування на даній ділянці знаходимо по формулі:

$$\omega = \frac{dv}{dt} = k^2 ce^{kt} \quad (3.37)$$

Таким чином, були визначені всі основні кінематичні параметри метеорного тіла при русі його в атмосфері Землі. Далі, обчислюємо геліоцентричну орбіту метеороїда.

3.6. Обчислення елементів геліоцентричної орбіти метеорного тіла.

Таким чином, у результаті попередніх вимірювань і обчислень ми одержали дві величини (координати видимого радіанта й атмосферної швидкості метеора під час вльоту в атмосферу) необхідні для обчислення елементів геліоцентричної орбіти метеорного тіла. Існує ряд способів для таких обчислень, і нижче наведений один з них.

3.6.1. Виправлення швидкості за обертання Землі.

Обчислюємо зоряний час метеора (\mathcal{G}_S) і часовий кут радіанта (у годинах):

$$t_R = \mathcal{G}_S - \alpha_R \quad (3.38)$$

Необхідно врахувати, що часовий кут повинен лежати в межах ($0^h < t_R < 24^h$). Екваторіальні координати точки на небесній сфері, куди спрямований вектор руху Землі в момент прольоту метеора:

$$\alpha_0 = \mathcal{G}_S + 90^\circ \quad (3.39)$$

Необхідно врахувати, що значення прямого сходження повинно лежати в межах ($0^\circ < \alpha_0 < 360^\circ$). Так як, точка, куди спрямовано вектор руху Землі лежить на небесному екваторі, тоді $\delta_0 = 0^\circ$.

Знаходимо всі необхідні доповнюючі вектори і кут між напрямком вектора швидкості обертання Землі й вектором напрямку позаатмосферної швидкості метеора:

$$\cos \Psi = \cos \delta_R \cos(\alpha_R - \alpha_0) \quad (3.40)$$

$$u = \frac{2\pi(R_E + H_{\max}) \cos \varphi'}{86164,091} \quad (3.41)$$

Остаточно маємо виправлену за обертання Землі позаатмосферну геоцентричну швидкість метеора:

$$V_{gT} = \sqrt{V_{obs}^2 + u^2 - 2V_{obs} u \cos \Psi} \quad (3.42)$$

3.6.2. Виправлення швидкості за притягання Землі.

Розрахуємо прискорення сили тяжіння на висоті H_{\max} , для якої визначається позаатмосферна швидкість метеорного тіла (точка початку входу метеороїда в атмосферу). Прискорення сили тяжіння на широті φ :

$$g_\varphi = g_0(1 + \beta_g \sin^2 \varphi) \quad (3.43)$$

На висоті метеора, для якого визначається позаатмосферна швидкість:

$$g_m = g_\varphi \left(\frac{R_E}{R_E + H_{\max}} \right)^2 \quad (3.44)$$

Тоді, геоцентрична швидкість, виправлена за притягання Землі:

$$V_g = \sqrt{V_{gT}^2 - 2g_m(R_E + H_{\max})} \quad (3.45)$$

3.6.3. Виправлення координат радіанта за добову аберацію (обертання Землі).

Обчислимо виправлення координат радіанта за добову аберацію (обертання Землі):

$$\Delta\alpha_{RT} = -\frac{1594.45}{60V_g} \cos\varphi \cos t_R \cos\delta_R \quad (3.46a)$$

$$\Delta\delta_{RT} = -\frac{1594.45}{60V_g} \cos\varphi \sin t_R \sin\delta_R \quad (3.46б)$$

У цих формулах діленням на 60 переводимо кутові хвилини у кутові градуси, а часовий кут радіанта t_R виражаємо у кутових градусах.

Таким чином, виправлені координати радіанта за добову аберацію:

$$\alpha'_R = \alpha_R + \Delta\alpha_{RT} \quad (3.47a)$$

$$\delta'_R = \delta_R + \Delta\delta_{RT} \quad (3.47б)$$

Далі, по формулах переходу, знаходимо горизонтальні координати виправленого радіанта (азимут, кутову висоту й зенітну відстань): Az' , h' і $Z' = 90 - h'$.

3.6.4. Виправлення координат радіанта за зенітне притягання Землі.

Виправлена за всі поправки швидкість метеора (V_z):

$$V_z = \sqrt{V_g^2 + 2g_m(R_E + H_{\max})}, \quad (3.48)$$

Виправлення знаходимо по формулі Скіапареллі:

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} \Delta Z_R = \frac{V_z - V_g}{V_z + V_g} \operatorname{tg} \frac{1}{2} Z_R \quad (3.49)$$

Вносимо поправки в значення зенітної відстані, при цьому азимут радіанта залишається без змін:

$$A''_R = A'_R \quad (3.50a)$$

$$Z''_R = Z'_R + \Delta Z_R \quad (3.50б)$$

$$h'' = 90 - Z''_R \quad (3.50в)$$

Далі, по формулах переходу, отримані горизонтальні координати переводимо в екваторіальні сферичні координати α'' й δ'' .

3.6.5. Координати виправленого радіанта з урахуванням поправок за добову аберацію й за зенітне притягання.

З урахуванням поправок за добову аберацію й за зенітне притягання екваторіальні координати виправленого радіанта:

$$\alpha'_R = \mathcal{G}_S - \alpha'' \quad (3.51a)$$

$$\delta'_R = \delta'' \quad (3.51б)$$

Переводимо екваторіальні координати радіанта в екліптичні. Для цього обчислимо середню екваторіальну довготу Сонця λ_{\odot} і обчислюємо нахил екліптики (ε).

Розрахуємо геоцентричні екліптичні сферичні координати радіанта:

$$\sin \beta_R = \cos \varepsilon \sin \delta'_R - \sin \varepsilon \cos \delta'_R \sin \alpha'_R \quad (3.52a)$$

$$\operatorname{tg} \lambda_R = \frac{\sin \alpha'_R \cos \varepsilon + \operatorname{tg} \delta'_R \sin \varepsilon}{\cos \alpha'_R} \quad (3.52б)$$

3.6.6. Обчислення елементів геліоцентричної орбіти метеороїда.

Визначимо координати апекса. Для цього знайдемо ряд проміжних величин. Обчислимо Юліанську дату спостережень (JD) і інтервал часу (T), що відлічується від епохи 1900 січень 0,5⁽⁸⁾ і вимірюваний у юліанських сторіччях, що містять 36525 ефемеридних діб:

$$T = \frac{JD - 2415020}{36525} \quad (3.53)$$

Середня геометрична довгота Сонця дорівнює (у градусах):

$$L_S = 279.69668 + 36000.76892 T + 0.0003025 T^2 \quad (3.54)$$

⁸ Для епохи 2000 січень 0,5 можна скористатись відповідними формулами, які приведені у астрономічних щорічниках, або, наприклад, у роботі [194].

Середня аномалія Сонця дорівнює (у градусах):

$$M_s = 358.47583 + 35999.04975 T - 0.00015 T^2 - 0.0000033 T^3 \quad (3.55)$$

Ексцентриситет орбіти Землі:

$$e_{\oplus} = 0.01675104 - 0.0000418 T - 0.000000126 T^2 \quad (3.56)$$

Далі, вирішуємо рівняння Кеплера й одержуємо ексцентричну аномалію в радіанах (E_{\oplus}):

$$M_s = E_{\oplus} - e_{\oplus} \sin E_{\oplus} \quad (3.57)$$

Справжня аномалія:

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} E_{\oplus} = \sqrt{\frac{1-e_{\oplus}}{1+e_{\oplus}}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \nu_{\oplus} \quad (3.58)$$

Для розрахунку справжньої довготи Сонця визначимо допоміжні кути (у градусах):

$$A = 153.23 + 22518.7541 T \quad (3.59a)$$

$$B = 216.57 + 45037.5082 T \quad (3.59б)$$

$$C = 312.69 + 32964.3577 T \quad (3.59в)$$

$$D = 350.74 + 445267.1142 T - 0.00144 T^2 \quad (3.59г)$$

$$E = 231.19 + 20.2 T \quad (3.59д)$$

$$H = 353.4 + 65928.7155 T \quad (3.59е)$$

де члени з A і B представляють збурювальну дію Венери, члени з C - Юпітера, члени з D - Місяця, а член E пов'язаний з довгоперіодичною нерівністю.

Поправку, яку варто додати до довготи Сонця:

$$\Delta L_s = 0.00134 \cos A + 0.00154 \cos B + 0.002 \cos C + 0.00179 \sin D + 0.00178 \sin E \quad (3.60)$$

Обчислимо справжню довготу Сонця. Для цього додамо до середньої довготи Сонця справжню аномалію, віднімемо середню аномалію й додамо поправку (врахуємо, що $0^0 \leq \lambda_{\odot} \leq 360^0$):

$$\lambda_{\odot} = L_S + v_{\oplus} - M_S + \Delta L_S \quad (3.61)$$

Довгота перигелію земної орбіти в градусах:

$$\pi_{\oplus} = 102 + \frac{5}{60} + \frac{1.03}{60} (T - 1950) \quad (3.62)$$

Екліптична довгота апекса Землі:

$$\lambda_a = \lambda_{\odot} - 90 + \frac{57.1}{60} \sin(\lambda_{\odot} - \pi_{\oplus}) \quad (3.63)$$

Екліптична широта апекса Землі дорівнює нулю ($\beta_a = 0^0$).

Елонгація радіанта від апекса:

$$\cos \varepsilon_R = \cos \beta_R \cos(\lambda_R - \lambda_a) \quad (3.64)$$

При цьому врахуємо, що $\varepsilon_R < 180^0$ й знак $\cos \varepsilon_R$ дорівнює знаку $\cos(\lambda_R - \lambda_a)$.

Радіус-вектор орбіти Землі:

$$r_{\oplus} = \frac{1 - e_{\oplus}^2}{1 + e_{\oplus} \cos(\lambda_{\odot} - \pi_{\oplus})} \quad (3.65)$$

Орбітальна швидкість Землі (у км·сек⁻¹):

$$V_{\oplus}^2 = \frac{K_G^2}{k^2} \left(\frac{2}{r_{\oplus}} - 1 \right) \quad (3.66)$$

Цю швидкість одержали в розмірності (а.о.·добу⁻¹), тому, поділивши це значення на величину постійної k , швидкість виразимо в (км·сек⁻¹).

Геліоцентрична швидкість:

$$V_h = \sqrt{V_g^2 + V_{gT}^2 - 2V_g V_{gT} \cos \varepsilon_R} \quad (3.67)$$

Велика піввісь орбіти метеора:

$$a = \left(\frac{2}{r_{\oplus}} - V_h^2 \frac{k^2}{K_G^2} \right)^{-1} \quad (3.68)$$

Для обчислення справжньої елонгації радіанта скористаємося наступними міркуваннями. Так як:

$$\sin \varepsilon'_R = \frac{V_g}{V_{\oplus}} \sin \varepsilon_R \quad (3.69a)$$

$$\cos \varepsilon'_R = \frac{V_g^2 - V_h^2 - V_{\oplus}^2}{2V_h V_{\oplus}} \quad (3.69б)$$

Тоді

$$\operatorname{tg} \varepsilon'_R = 2 \frac{V_g - V_{\oplus} \sin \varepsilon_R}{V_g^2 - V_h^2 - V_{\oplus}^2} \quad (3.69в)$$

Екліптичні координати справжнього радіанта обчислимо в такий спосіб:

$$\sin \gamma = \frac{\sin \beta'_R}{\sin \varepsilon'_R} \quad (3.70a)$$

$$\cos \gamma = \frac{\operatorname{tg}(\lambda'_R - \lambda_a)}{\operatorname{tg} \varepsilon'_R} \quad (3.70б)$$

Екліптична справжня широта радіанта:

$$\sin \beta_R = \sin \varepsilon'_R \sin \gamma \quad (3.71)$$

Екліптична справжня довгота радіанта:

$$\sin \lambda_R = \frac{\sin \varepsilon'_R \cos \gamma}{\cos \beta'_R} \quad (3.72a)$$

$$\cos \lambda_R = \frac{\cos \varepsilon'_R}{\cos \beta'_R} \quad (3.72б)$$

$$\operatorname{tg} \lambda_R = \frac{\sin \lambda_R}{\cos \lambda_R} = \frac{\sin \varepsilon'_R \cos \gamma}{\cos \varepsilon'_R} + \lambda_a \quad (3.72в)$$

Нахил орбіти:

$$\operatorname{tg} i = \frac{\operatorname{tg} \beta_R}{\sin(\lambda_R - \lambda_\odot)} \quad (3.73)$$

Параметр орбіти метеорного тіла:

$$p = \frac{k}{K_G} \frac{r_\oplus V_h \sin \beta_R}{\sin i} \quad (3.74)$$

Справжня аномалія метеорної орбіти:

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{k}{K_G} \frac{\sqrt{pr_\oplus} V_h \cos \beta_R \cos(\lambda_R - \lambda_\odot)}{p} \quad (3.75)$$

Коли метеор перебував у низхідному ($\beta_R < 0$) або у висхідному вузлі ($\beta_R > 0$):

$$\omega = -\nu \text{ при } (\beta_R < 0) \quad (3.76a)$$

$$\omega = 180^\circ - \nu \text{ при } (\beta_R > 0) \quad (3.76b)$$

Ексцентриситет орбіти метеора:

$$e = \frac{p - r_\oplus}{r_\oplus \cos \nu} \quad (3.77)$$

Перигелійна відстань орбіти метеора (якщо $e < 1$):

$$q = a(1 - e) \quad (3.78a)$$

Якщо орбіта близька до параболічної ($e \sim 1$), тоді:

$$q = \frac{p}{1 - e} \quad (3.78b)$$

Афелійна відстань орбіти метеора:

$$q' = 2a - q \quad (3.79)$$

Довгота висхідного вузла орбіти метеора:

$$\Omega = \lambda_\odot \text{ при } (\beta > 0) \quad (3.80a)$$

$$\Omega = \lambda_\odot + 180^\circ \text{ при } (\beta < 0) \quad (3.80b)$$

Ексцентрична аномалія:

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} E = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \nu \quad (3.81)$$

Середня аномалія орбіти метеора:

$$M = E - e \sin E \quad (3.82)$$

Обчислюємо останній елемент геліоцентричної орбіти метеороїда – момент проходження перигелію (T_p). Для еліптичної орбіти ($e < 1$):

$$T_p = t_0 - \frac{M}{\frac{3}{a^2}}, \quad (3.83a)$$

де t_0 – час метеора (у Юліанських днях).

У випадку якщо орбіта метеороного тіла гіперболічна ($e > 1$):

$$T_p = t_0 - \frac{e \operatorname{sh}(E) - E}{V_h \sqrt{\frac{1}{2} r_\oplus}} |a|^{\frac{3}{2}} \quad (3.83б)$$

Погрішності в елементах орбіти можна визначити, диференціюючи вихідні формули по яких обчислювалися ці елементи [49]. У дисертаційній роботі реалізується інший варіант – “метод хитань”. Цей метод полягає в тому, що додаючи до середніх значень координат радіанта й позаатмосферної швидкості значення їхніх погрішностей (відповідно $\pm \Delta \alpha_R$, $\pm \Delta \delta_R$, $\pm \Delta V_\infty$), щораз обчислюємо елементи геліоцентричної орбіти метеора. У такому випадку, існує 9 варіантів у наборі елементів орбіт, по яких розраховуємо їхні середні значення й відхилення від середніх значень. Аналіз точності визначення основних кінематичних параметрів з використанням автором методів проведений нижче (параграфи 3.7 - 3.9) на конкретних прикладах.

3.7. Експрес-метод обчислення основних кінематичних параметрів болідних тіл, що спостерігаються у денний час доби.

Розглянемо метод обчислення атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів болідних тіл, що спостерігаються у денний час доби на прикладі Челябінського боліда 15 лютого 2013 року.

3.7.1. Особливості спостережень Челябінського метеоритного дощу 15 лютого 2013 року.

Особливістю Челябінського боліда з наступним випаданням метеоритного дощу 15 лютого 2013 року є його відеореєстрація з різних пунктів розташованих на відстанях у кілька сотень кілометрів від місця явища. Це дозволяє визначити з високою точністю основні кінематичні характеристики руху метеороїда в земній атмосфері.

Практично відразу після явища, в інтернеті почали публікуватися перші оцінки траєкторії, швидкості, різних фізичних характеристик метеороїда і його геліоцентричної орбіти. У момент випадання Челябінського метеоритного дощу спостерігалось близьке (27,7 тис. км) зближення із Землею астероїда 2012 DA₁₄. Ця обставина підігрівала інтерес до якнайшвидшого визначення геліоцентричної траєкторії. У дисертаційній роботі представлені методика і результати визначення основних кінематичних характеристик Челябінського боліда, зробленого по відеоспостереженням опублікованим в інтернеті (табл. 3.3, рис. 3.11). Повний каталог спостережень (960 відеозаписів і фото) явища опублікований в [96]. Серед відеозаписів налічується 400 різних відео, на яких відображено розвиток боліда. В онлайн-версії⁽⁹⁾ каталогу розміщено геодезичні координати місця зйомки та деякі додаткові відомості. Упевнено визначити траєкторію руху метеороїда можливо при наявності характерних ознак, видимих з різних пунктів.

⁹ <http://meteor.asu.cas.cz/Chelyabinsk/>

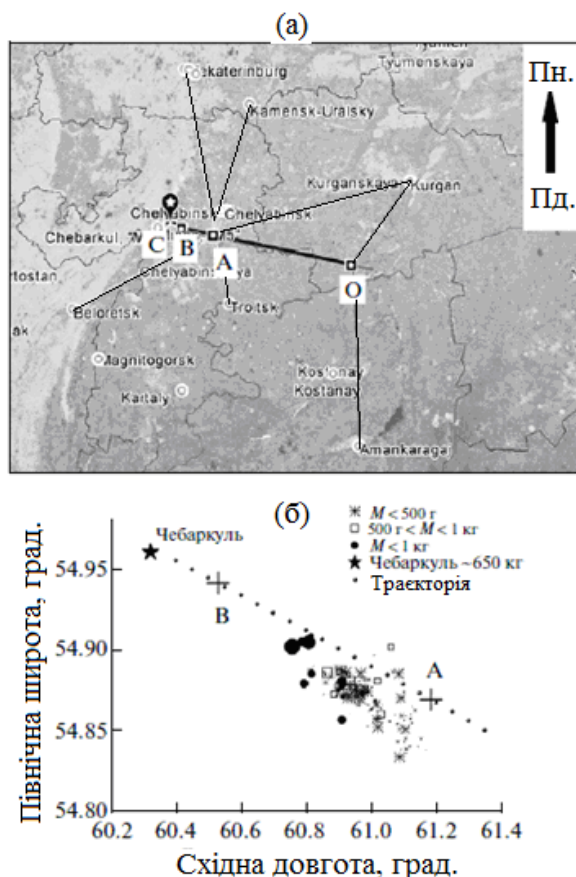


Рис. 3.11. (а) – Проекція на поверхню Землі траєкторії руху Челябінського метеороїда. Позначено початок світіння боліда (О) і область різкого гальмування болідного тіла (А), спостережуваного після першого акту дроблення; (В) – координати осколка (С₃, на рис.3.12) у момент руху зі швидкістю 2,27 км·сек⁻¹; (С) – місце знахідки фрагмента (~650 кг) в оз. Чебаркуль. На рисунку (б) – розташування знайдених фрагментів щодо обчисленої траєкторії.

На рис. 3.12 представлено зображення боліда зафіксованого автомобільним відеореєстратором на центральній площі в Каменськ-Уральському Свердловської області (табл. 3.3, Каменськ-Уральський¹). На рисунку показані три (А, В, С) основні фази дроблення метеороїда. Під час боліда кілька разів фіксувалося різке гальмування тіла з наступним його дробленням і збільшенням яскравості боліда. Перша фаза дроблення (А) була найбільш потужна, а наприкінці спостерігалось різке гальмування речовини. Друга фаза дроблення (В) була слабкіше по світності з наявністю області різкого гальмування. Далі рух великого осколка метеороїда (С₃), супроводжувалося дробленням. З різних населених пунктів, де велася

відеореєстрація, були замічені осколки дроблення (C_1 і C_2), при цьому, вони трохи відставали від основного тіла (C_3).

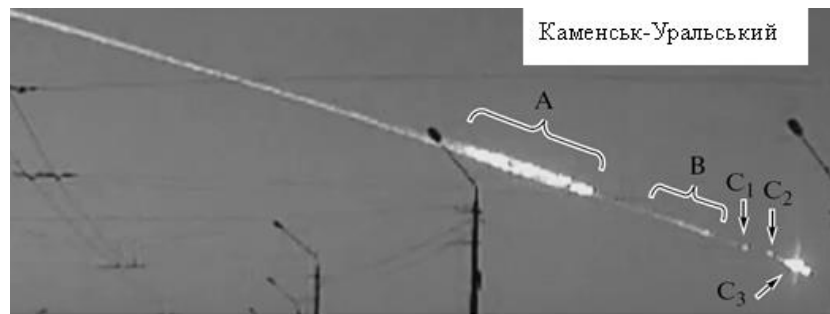


Рис. 3.12. Болід 15 лютого 2013 року, видимий на центральній площі в Каменськ-Уральськом Свердловської області (Каменськ-Уральський¹).

Деякі відеофайли містять чітко помітний на фоні неба початок світіння метеороїда в момент входу в щільні шари атмосфери. Час початку світіння з високою точністю можна визначити за спостереженнями з відеореєстратора оснащеного GPS-навігатором, а показання годин, при цьому, відтворюється в кадрі відео (наприклад, див. відеофайл у табл. 3.3, Алга⁹). В інших випадках з визначенням часу явища виникають труднощі, тому що часто показання годин на відеореєстраторі мають великі погрішності.

Значну кількість відеофайлів з фіксацією боліда отримано під час переміщення транспортного засобу, у якому є відеореєстратор. Такі спостереження можуть бути використані для дослідження після попереднього поділу відеозображення на окремі кадри.

Особливістю кожного відео є те, що зображення тією чи іншою мірою спотворені ефектами дисторсії, а оптичні характеристики відеореєстратора не відомі. Безсумнівно, треба знайти спосіб, що дозволить виправити зображення за оптичні спотворення. Наприклад, безпосередньо вивчити оптичні властивості відеореєстратора, на якому провели спостереження. Другим способом може бути порівняння зображення, що містить болід із зображенням цієї ж місцевості, отриманим за допомогою іншого оптичного приладу, але з відомими оптичними властивостями. Цей же спосіб дозволить зробити точні астрономо-геодезичні прив'язки (наприклад, у нічний час доби

по прив'язці до зірок або іншим способом). Такі роботи, без сумнівів дадуть самий точний результат, але вимагають безпосередньої присутності на місці спостережень, багато часу й зусиль.

Таблиця 3.3

Координати пунктів спостережень і список відеофайлів (посилання див. у списку літератури [75]), використаних для визначення кінематичних характеристик руху Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 року.

Пункт спостережень	λ , E	ϕ , N
Каменськ-Уральський ¹	61°55'06,79"	56°24'54,46"
Єкатеринбург (I) ²	60°45'09,48"	56°45'12,91"
Єкатеринбург (II) ³	60°31'00,38"	56°48'47,23"
Курган ⁴	65°17'34,85"	55°28'21,92"
Аманкарагай ⁵	64°05'00,53"	52°23'23,77"
Картали ⁶	60°37'25,44"	53°03'13,47"
Магнітогорськ ⁷	58°58'00,88"	53°23'15,54"
Челябінськ ⁸	61°26'41,21"	55°09'58,77"
Алга ⁹	57°20'05,94"	49°55'14,24"
“М5”-Міасс ¹⁰	60°03'11,32"	54°56'39,12"
“М5”-Чебаркуль ¹¹	60°19'33,08"	54°55'08,85"
Белорецьк ¹²	58°24'36,25"	53°57'09,58"
Троїцьк ¹³	61°31'52,75"	54°04'37,40"

Існують причини, коли необхідно як можна точніше дати експрес-оцінку кінематичним властивостям боліду в перерахованих вище нестандартних ситуаціях. У даній роботі описується один з можливих способів для вирішення цього завдання. Методика може бути застосована при організації мережі для відстеження болідів із вивченими оптичними характеристиками відеокамер та поле зору, яких, мають геодезичні прив'язки.

3.7.2. Методика вимірювання відеозображення.

Докладне фотографічне відображення земної поверхні в широко відомому й загальнодоступному програмному забезпеченні *Googl Earth*⁽¹⁰⁾ дозволяє ототожнити наземні об'єкти, використовувані для прив'язки азимутів напрямків на точки траєкторії боліда. Визначити місце зйомки можливо при візуальному порівнянні розташування стаціонарних об'єктів, що потрапили в поле зору відеокамери, з положенням зображень цих об'єктів в *Googl Earth*. Вдалим варіантом буде випадок, якщо відеоспостереження проводилося в безпосередній близькості до стаціонарно встановленого об'єкта, що легко ототожнюється на місцевості. Наприклад, на (рис. 3.13), відеоспостереження боліда проводилося з автомобіля в Каменськ-Уральському¹, що зупинився в безпосередній близькості від світлофора (на кадрі видно праворуч). Геодезичні координати світлофора (відповідно, координати місця спостережень) визначаються за допомогою *Googl Earth*. У деяких випадках, автори відео вказували геодезичні координати місця, визначеного за допомогою GPS-навігатора. Похибка у координатах місця розташування спостерігача визначається точністю GPS-навігатора і *Googl Earth*. Вважається, що типова точність сучасних GPS-Приймачів у горизонтальній площині не гірше 6 - 8 м при гарній видимості супутників і використанні алгоритмів корекції, а в деяких випадках існує можливість знизити похибка до 1 - 2 м. Варто звернути увагу не тільки на точність

¹⁰ проект компанії Google, <http://www.google.com/earth/index.html>

навігатора, але й на точність карти, по якій проводиться позиціонування. Масштаб зображень *Google Earth* у деяких випадках може становити 0,16 метрів на піксель (якщо зображення було отримано за допомогою аерофотозйомки), тоді як супутниковий знімок *Google Earth* поганої якості, може мати відхилення у десятки метрів. Результати спеціально проведених автором дисертації експериментів із застосуванням різних моделей “побутових” GPS-приймачів узгоджуються (у межах до 5 метрів) з показаннями місця розташування в *Google Earth*. Такий експеримент легко відтворити (досить нанести показання координат GPS-навігатора на зображення *Google Earth*).

Визначимо за допомогою *Google Earth* азимуту (A_{obj}) напрямку із точки спостереження на об'єкти (наприклад, опорні стовпи електропередач, стовпи з розміщеною на них рекламою, заводські труби та ін.), що потрапили в поле зору відеореєстратора (рис. 3.13). Важливо вибирати об'єкти прив'язки найбільш віддалені від місця зйомки, щоб зменшити вплив невизначеності в місці розташування відеореєстратора. Бажано не вибирати за орієнтири об'єкти, спотворені дисторсією.

Природно, що такі виміри по прив'язці до опорних орієнтирів можна провести й безпосередньо на місці відеореєстрації за допомогою теодоліта. Необхідність такого способу прив'язки виникає, якщо на зображенні *Google Earth* дана місцевість відображається з поганою роздільною здатністю.

На вимірюваному відеокадрі вибираємо систему координат таким чином, щоб її нуль-пункт збігся з одним з кутів зображення (наприклад, у нашому випадку, це верхній лівий кут), вісь абсцис (X) направимо паралельно горизонтальній границі зображення (рис. 3.13б). У результаті вимірювань одержимо прямокутні координати (X_{obj} , Y_{obj}) об'єктів прив'язки. Побудуємо графік залежності A_{obj} від X_{obj} (приклад такої залежності наведений на рис. 3.14). Точки на даному графіку апроксимуємо лінійною функцією:

$$A_{obj} = MX_{obj} + b, \quad (3.84)$$

де b – деякий коефіцієнт.

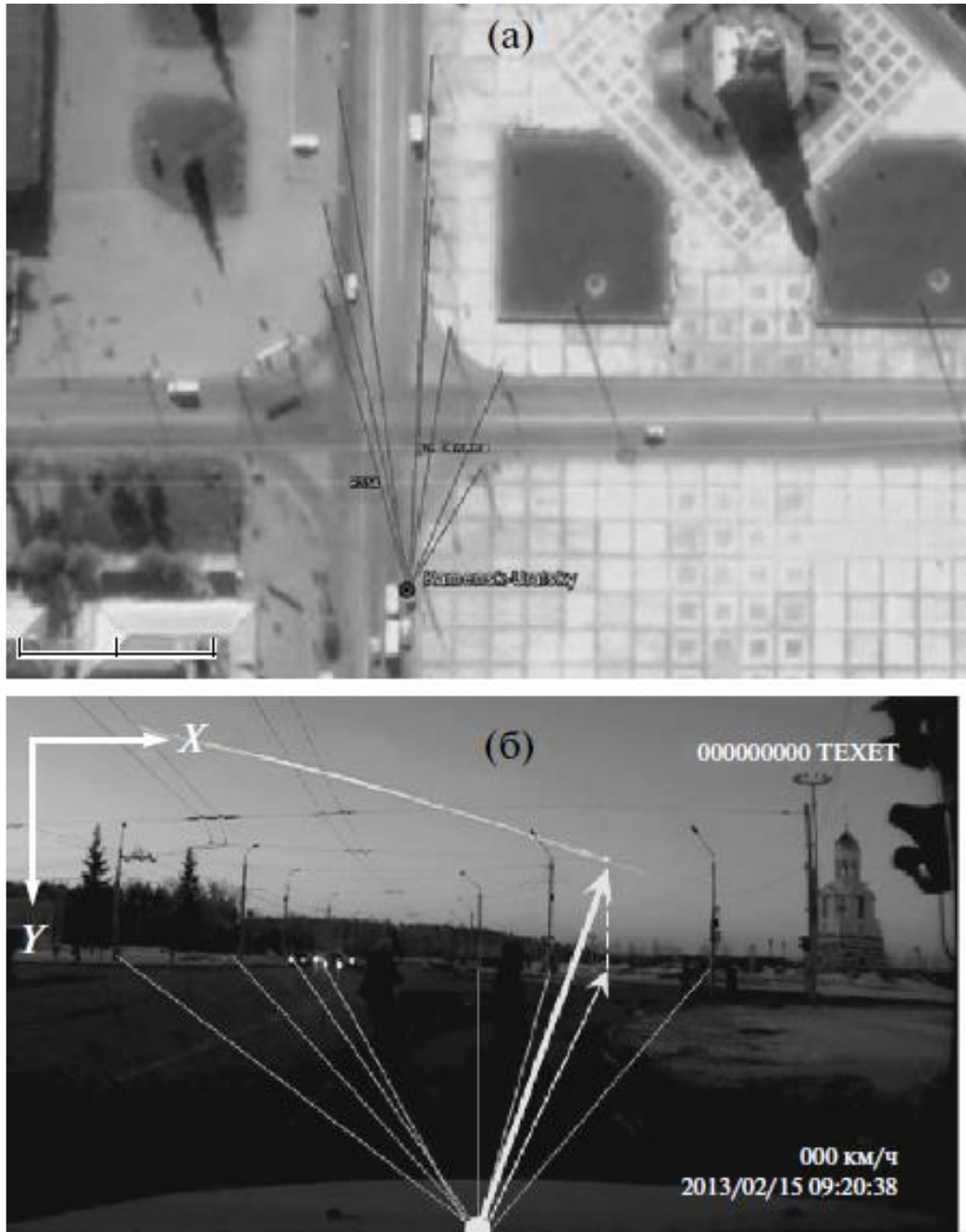


Рис. 3.13. Схема вимірювання азимутів (A_{obj}) напрямку на опорні об'єкти координатної прив'язки з пункту спостереження за допомогою *Googl Earth* – (а) і вимірювання прямокутних координат (X_{obj}) у системі зображення опорних об'єктів – (б). Приклад наведений для випадку вимірювання відеозображення отриманого в Каменськ-Уральському¹.

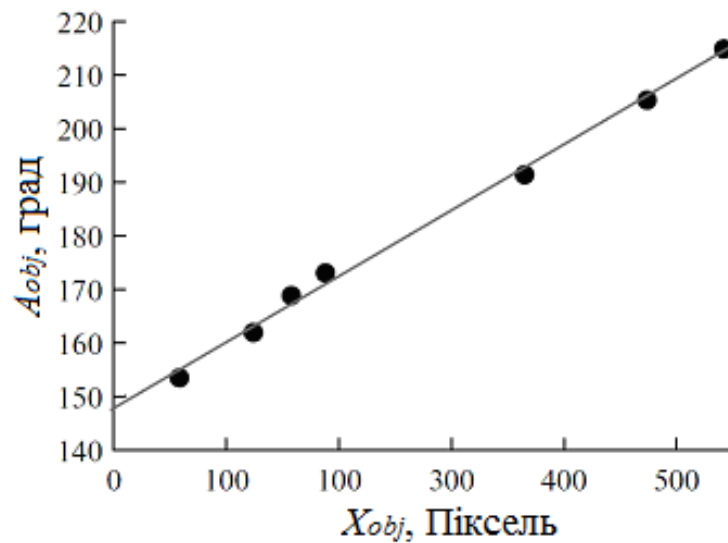


Рис. 3.14. Зв'язок прямокутної координати (X_{obj}) об'єкта, прийнятого за орієнтир з його азимутом (A_{obj}). Для одного з відеокадрів (Каменськ-Уральський¹).

Складаючи таку апроксимацію для кожного вимірюваного кадру необхідно стежити, щоб кутовий коефіцієнт (M) був з мінімальним розкидом за значеннями. Не важко зрозуміти, що в даній залежності значення M по модулю дорівнює середньому значенню масштабу зображення з розмірністю [кут. градус·піксель⁻¹]. Використовуємо побудовану залежність для переходу від обмірюваної прямокутної координати точки зображення боліда (X_{bol}) на відеокадрі до азимута напрямку (A_{bol}) на неї з місця відеозйомки.

3.7.3. Траєкторія Челябінського метеороїда в атмосфері Землі.

Проведемо лінії візування на точки траєкторії боліда, одночасно видимі з кожного спостережного пункту. У нашому випадку, найбільш впевнено з різних пунктів ототожнюються точки максимального гальмування наприкінці кожної фази дроблення (А і В на рис. 3.12).

Область початку світіння боліда під час входу в атмосферу Землі так само використовувалася для визначення атмосферної траєкторії метеороїда. У цьому випадку, на відео можна визначити кадр із проявом перших ознак світіння боліда. Дана область трохи розмита в просторі й часі через контраст

на світлому фоні неба, причому в кожному пункті спостереження фон неба різний.

Визначимо геодезичні координати $(\lambda_{bol}, \varphi_{bol})$ проекцій одночасних точок боліда на поверхню Землі як середньозважені значення координат перетинання напрямків на них з різних пунктів спостережень (рис. 3.11). Швидко й з гарним наближенням точки перетинання ліній візування можна визначити, скориставшись програмним забезпеченням *Googl Earth*.

Більш строго й з високою точністю це можна зробити методом, описаним у параграфі 3.4. Дійсно, нам відомі геодезичні координати двох пунктів спостереження (λ_1, φ_1) і (λ_2, φ_2) , азимути ліній візування на обумовлену точку (A_{10}) і (A_{20}) . У такому випадку координати точки перетинання ліній візування (λ_0, φ_0) визначимо відповідно до формул (3.21) – (3.24).

Для розрахунку геодезичних координат проекції на поверхню Землі початку світіння боліда у нашому випадку використовувалися виміри відеозображень отриманих в (табл. 3.3, Курган⁴, Аманкарагай⁵, Магнітогорськ⁷, “М5”-Міасс¹⁰, “М5”-Чебаркуль¹¹). Середньозважені значення координат даної точки наступні:

$$\lambda_{beg} = 64^{\circ}00'02.74''E \pm 2.1'$$

$$\varphi_{beg} = 54^{\circ}30'54.66''N \pm 3.0'$$

Для розрахунку геодезичних координат проекції на поверхню Землі точки максимального гальмування в момент першого акту дроблення використовувалися виміри відеозображень отриманих в (табл. 3.3, Каменськ-Уральський¹, Єкатеринбург (II)³, Курган⁴, Белорецьк¹², Троїцьк¹³, Аманкарагай⁵, Картали⁶). Середньозважені значення координат даної точки наступні:

$$\lambda_{crush} = 61^{\circ}11'01.88''E \pm 1.6''$$

$$\varphi_{crush} = 54^{\circ}52'06.68''N \pm 3.1'$$

Таким чином, азимут напрямку руху метеороїда становить $A = 283.39^\circ \pm 1.7^\circ$ або в напрямку на радіант $A_r = 101.09^\circ \pm 1.7^\circ$ (азимут геодезичний, що веде відлік від напрямку на Північ).

У журналі *Science* були освітлені основні результати на основі різнобічного вивчення Челябінського явища [177]. Деякі дані цікаво порівняти з результатами розрахунків за допомогою методики, що описана в дисертації. Зокрема, на рис. 3.11б відзначені розташування місць знахідок метеоритів щодо обчисленої проекції траєкторії на земну поверхню. В [58] опубліковано результат розрахунків азимута траєкторії польоту Челябінського метеороїда по 211 метеоритних фрагментах з відомими координатами знахідок на земній поверхні. Автори одержали азимут траєкторії польоту рівний 285° . З іншого боку, автори приводять рівняння лінії проекції траєкторії на земну поверхню ($\varphi = -0.1572\lambda + 64.451$). Таким чином, у якісній мері (тому що через вітровий знос фрагментів під час падіння середня вісь еліпса розсіювання буде трохи відрізнятися від реальної траєкторії болідного тіла що руйнується) обчислений у дисертаційній роботі напрямок траєкторії підтверджується розташуванням на земній поверхні знайдених великих метеоритних осколків.

Слід зазначити, що обчислена лінія проекції траєкторії перетинає оз. Чебаркуль на відстані порядку 301 м від місця падіння біля півострова Крутик великого фрагмента Челябінського метеороїда. Зазначена величина, у цьому випадку, характеризує реальне поперечне відхилення місця падіння зазначеного уламка від обчисленої проекції атмосферної траєкторії болідного тіла. По напрямку й положенню проекція траєкторії в межах похибок вимірювань погоджується з результатами розрахунків на основі матеріалу спеціально проведеної експедиції по астрономо-геодезичній прив'язці вимірюваних точок зображення боліда [177]. Так, автори зазначеної публікації приводять значення азимута напрямку траєкторії $283.2^\circ \pm 0.2^\circ$.

3.7.4. Визначення висоти польоту Челябінського метеороїда над земною поверхнею.

Існує спосіб, за допомогою якого, можна зробити оцінку лінійних висот будь-яких точок боліда над поверхнею Землі. Такі розрахунки можна провести по прямих вимірах траєкторії видимих зображень боліда. Коли траєкторія метеороїда проектує на фоні зірок з відомими координатами, обчислення не представляють труднощі. У нашому ж випадку кутові координати найбільш точно можна визначити тільки для азимутів (A_{bol}) як описано вище. При складанні залежності координати (A_{obj}) від обмірюваної в системі знімка координати (X_{obj}), ми використовуємо апроксимацію лінійною функцією (3.84) і обчислюємо кутовий масштаб (M).

У денний час доби виникають складнощі у визначенні кутової висоти боліда, тому що відсутні для цих цілей орієнтири по кутовій висоті. Тому, скористаємося наближеним способом. Для визначення кутової висоти над горизонтом будь-якої точки боліда припустимо, що кутовий масштаб (M) як по азимуту, так і по кутовій висоті над горизонтом на зображенні однаковий. Якщо формат використовуваного для дослідження відеофайлу припускає апаратний стиск по одній з координат відеокадру, тоді це необхідно враховувати. Наприклад, масштаб M по осі координат Y для відео (Каменськ-Уральський¹) у два рази менший, ніж по осі координат X , що пов'язано з форматом відображення відеофайлу під час вимірювань.

Висоту над горизонтом деякої точки боліда обчислимо по формулі:

$$h_{bol} = M|Y_{bol} - Y_0|, \quad (3.85)$$

де Y_0 – координата на відеокадрі прийнята за рівень горизонту, Y_{bol} – координата боліда.

Оцінити координату Y_0 можна по точці перспективи паралельно розташованих об'єктів, наприклад, бордюри прямолінійної дороги, по якій рухається автомобіль із відеореєстратором, основи паралельно розташованих будинків або стовпів та ін. (рис. 3.15).

Обчислення лінійних висот проводиться відповідно до формул (3.25а) - (3.25в), наведених у параграфі 3.4. У табл. 3.5 наведені результати обчислень висот основних фаз Челябінського боліда за описаною методикою.



Рис. 3.15. Схема до визначення кутової висоти боліда на вимірюваному зображенні.

Значення висот узгоджуються з результатами інших авторів. Наприклад, за спостереженнями за поширенням акустичних хвиль відповідних інфразвуковим частотам від боліда [185] висота джерела вибуху становить близько 20 км. По даним NASA [138] спалах максимальної яскравості відбувся на висоті 23,3 км. У публікаціях Центрального бюро астрономічних телеграм міжнародного астрономічного союзу (IAU) була опублікована електронна телеграма № 3423 з розрахунками параметрів траєкторії і геліоцентричної орбіти Челябінського метеороїда [94]. Автори одержали значення висот близькі до результатів розрахунків у дисертаційній роботі. Так, висота загорання становила 91,83 км, основні фази дроблення відбулися на висотах 31,73 і 21,05 км. У іншій публікації [177], автори приводять значення висот: початок світіння - 97,1 км, максимальної яскравості - 29,7 км, закінчення першої фази дроблення $27 \pm 0,7$ км, фінальне значення - 13,6 км.

Таблиця 3.4

Оцінка лінійних висот (H) над земною поверхнею особливих точок боліда

Пункт спостережень	Y_0 , (ріх)	Y , (ріх)	M , $(\frac{\circ}{ріх})$	h , (°)	H' , (км)	ΔH , (км)	H , (км)
<i>Початок світіння</i>							
Курган ⁴	304	60	0,128	31,11	82,27	1,24	83,51
Аманкарагай ⁵	431	189	0,102	24,64	110,32	4,79	115,11
Магнітогорськ ⁷	487	333	0,100	15,40	98,73	9,96	108,69
Середнє (H)					97,11	5,33	102,44
<i>Перша область різкого гальмування (А)</i>							
Курган ⁴	304	259	0,128	5,74	27,20	5,58	32,78
Картали ⁶	192	156	0,163	5,87	21,15	3,65	24,80
Кам.-Урал. ¹	344	221	0,063	7,72	24,22	2,19	26,40
Середнє (H)					24,19	3,80	27,99
<i>Друга область різкого гальмування (В)</i>							
Курган ⁴	304	277	0,128	3,44	17,74	6,66	24,40

При уважному порівнянні значень висот з аналогічними результатами інших авторів звертає на себе увагу, що траєкторія польоту в дисертаційній роботі проходить трохи вище, а для відповідних геодезичних координат похибки вимірювань висот більші. Це, у першу чергу, відіб'ється на

визначенні кута траєкторії до земної поверхні. Таку ситуацію можна виправити або за рахунок збільшення кількості вимірювань відеофайлів з різних пунктів спостережень (у дисертаційній роботі у вимірюваннях використовувалося невелика кількість відеофайлів), або за рахунок спеціально проведених робіт з астрономо-геодезичної прив'язки безпосередньо в пунктах спостережень. Але, у середньому, результати по визначенню кута нахилу траєкторії мало відрізняються від аналогічних вимірювань іншими методами.

Таким чином, для подальших розрахунків кута нахилу траєкторії приймаємо обчислені в цій роботі значення висоти початку світіння 102,4 км і основних фаз дроблення на висотах 28,0 км і 24,4 км.

3.7.5. Zenitna vidstan' radianta. Kut naхилу траєкторії Челябінського метеороїда.

Значення кута нахилу атмосферної траєкторії до земної поверхні можна визначити по вимірах довжин тіней від предметів під час яскравої фази боліда [218, 219]. Але zenitnu vidstan' radianta (Z_R) або кутову висоту над горизонтом (h_R) легко знайти, якщо відомі лінійні висоти боліда (H_1) і (H_2) у пунктах з координатами (λ_1, φ_1) і (λ_2, φ_2). Для цього розглянемо трикутник OA_1B_1 (рис. 3.16).

У цьому трикутнику відомо дві сторони $OA_1 = OA + AA_1 = R_1 + H_1$ й $OB_1 = OB + BB_1 = R_2 + H_2$. Радіуси Землі R_1 і R_2 у пунктах А і В знаходимо відповідно до формул (3.3) – (3.5), а кут Θ знаходимо відповідно до формули (3.9). Потрібно знайти інші кути трикутника, які визначають zenitnu vidstan' radianta в пунктах А і В. Кутова висота radianta в пункті, над яким відбулася перша фаза дроблення і спостерігалася різке гальмування метеороїда ($61^{\circ}11'01.88''E \pm 1.6''$, $54^{\circ}52'06.68''N \pm 3.1'$) становить $20,5^{\circ}$. Зазначений кут узгоджується зі значеннями нахилу траєкторії до земної поверхні, що отриманий іншими авторами по зміні тіні від боліда в процесі його руху по

небу (порядку 19°). Помітимо, що якщо прийняти для розрахунків тільки значення висот (H'), тоді кут нахилу траєкторії дорівнює $21,3^\circ$.

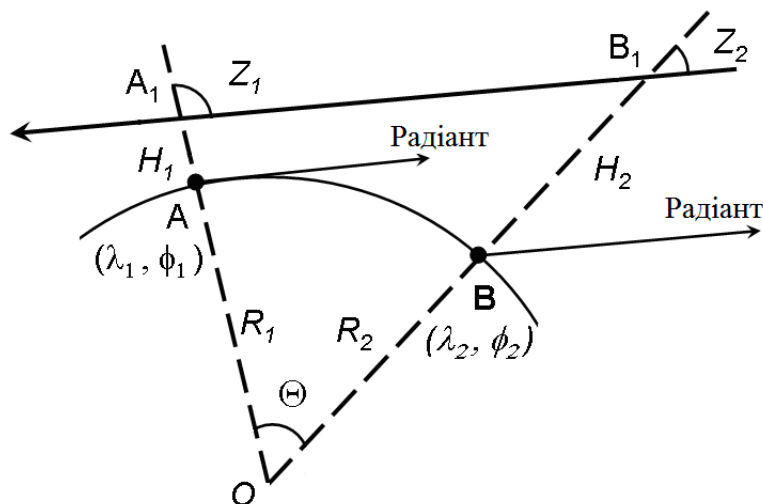


Рис. 3.16. Схема до визначення зенітної відстані радіанта за відомим значенням лінійних висот боліда (H_1 і H_2) у пунктах з координатами (λ_1, ϕ_1) і (λ_2, ϕ_2) .

3.7.6. Швидкість руху Челябінського метеороїда.

Знаючи геодезичні координати місця розташування спостерігача (λ_{obs} , ϕ_{obs}), по формулах (3.21) – (3.24) можна обчислити геодезичні координати (λ_0, ϕ_0) точки перетину проекції на земну поверхню траєкторії боліда з лінією візування спостерігача на точку траєкторії боліда (A_{obs}).

Шлях (S_1), пройдений метеороїдом у проекції на земну поверхню з пункту із координатами $(\lambda_{01}, \phi_{01})$ у пункт із координатами $(\lambda_{02}, \phi_{02})$:

$$S_1 = 2R_{\oplus} \sin \frac{\Theta}{2} \quad (3.86)$$

Шлях (S), пройдений метеороїдом в атмосфері Землі знайдемо згідно:

$$S = \frac{S_1}{\cos h_R}, \quad (3.87)$$

де h_R – кутова висота радіанта, що була визначена вище.

Середнє значення швидкості на розглянутій ділянці:

$$V = \frac{S}{\Delta t}, \quad (3.88)$$

де Δt – проміжок часу між кадрами відеофільму, по яких визначається пройдений шлях.

Кількість кадрів, що припадають на 1 секунду запису, варіюються через апаратний стиск вихідного відеофайлу. Час на окремих кадрах відображається з точністю до секунди, тому, найкраще обмежитися вимірами кадрів, на яких таймер годин показував перехід на наступну секунду (у такому випадку $\Delta t = 1$ сек).

На рис. 3.17 представлений графік зміни атмосферної швидкості руху Челябінського метеороїда залежно від геодезичних координат проекції траєкторії по вимірах відеофайлів, отриманих в Каменськ-Уральський¹, Єкатеринбург (I)² і Єкатеринбург (II)³. Для порівняння наведені оцінки швидкості інших авторів [94, 138, 177]. Вертикальною лінією показані координати епіцентру сейсмічних ефектів від вибуху метеороїда (на висоті порядку 20 км) за спостереженнями мережі регіональних станцій і деяких сейсмічних станцій Казахстану [185].

Необхідно відзначити, що самий яскравий фрагмент Челябінського боліда (C_3 на рис. 3.12), припинив світіння на околицях пункту з координатами ($60^{\circ}31'46.08''E$, $54^{\circ}56'24.97''N$). Відповідно до розрахунків у цьому місці зазначений метеороїд мав швидкість порядку $2,27 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$ (рис. 3.17). Пізніше, визначимо місце падіння його на земну поверхню і порівняємо з реальним місцем розташування знайденого найбільшого фрагмента метеороїда в озері Чебаркуль.

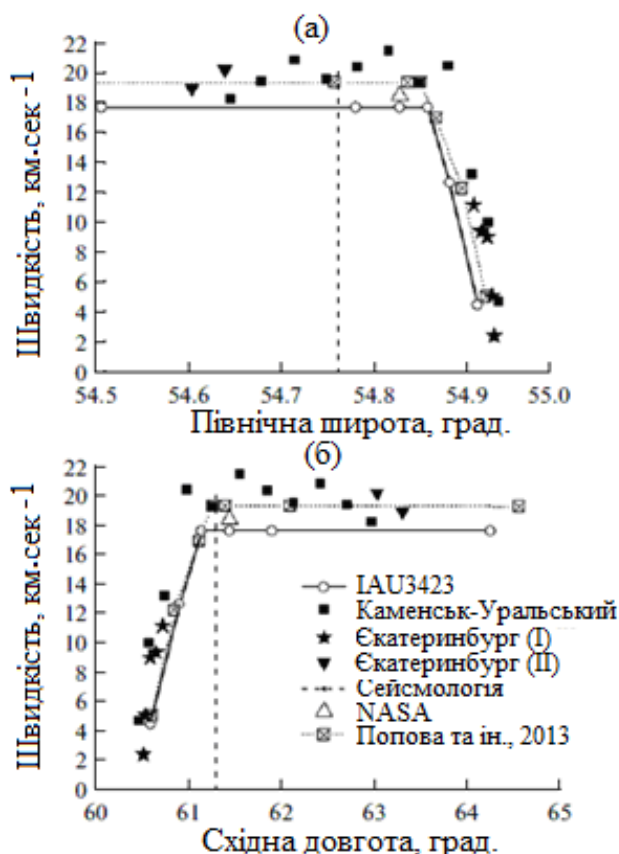


Рис. 3.17. Значення атмосферної швидкості руху Челябінського метеороїда залежно від геодезичних координат проекції траєкторії. По вимірах відеоспостережень, отриманих в Каменськ-Уральський¹ і Єкатеринбург (I)², Єкатеринбург (II)³. Для порівняння наведені оцінки швидкості інших авторів [94, 138, 177]. Вертикальною лінією зазначені координати епіцентру сейсмічних хвиль від вибуху метеороїда [185].

3.7.7. Позаатмосферна швидкість Челябінського метеороїда.

Надалі, для обчислення геліоцентричних елементів орбіти метеороїда, необхідно визначити його позаатмосферну швидкість (V_{∞}). У наших розрахунках використовуються формули (3.35) - (3.37).

При апроксимації функцією виду (3.35) обмірюваних атмосферних швидкостей (для точок положення боліда спостережуваних з Каменськ-Уральський¹), отримані наступні значення постійних:

$$b = 19,28660, k = 0,52206, c = -0,11122$$

Таким чином, відповідно до зазначених коефіцієнтів, позаатмосферна швидкість із урахуванням похибок вимірювань $V_{\infty} = 19,29 \pm 0,89$ км·сек⁻¹.

Помітимо, що при уважному вивченні графіка зміни швидкості з часом, не виявляється помітного гальмування болідного тіла на верхній ділянці траєкторії до моменту першої фази дроблення.

Для порівняння розглянемо значення позаатмосферної швидкості Челябінського боліда по вимірах інших авторів. Відповідно до попередніх результатів [94] $V_{\infty} = 17,5 \pm 0,5 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$, а в роботі [177] вказується значення $V_{\infty} = 19,16 \pm 0,15 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$.

3.7.8. Геліоцентричні елементи орбіти Челябінського болідного тіла.

Остаточо обчислено, що метеороїд рухався по геліоцентричній орбіті з орбітальним періодом $808,92 \pm 70,20$ середньої сонячної доби. Елементи орбіти наведені на епоху J2000.0 (MJD51544.0) у табл. 3.5. Середня аномалія $M_0 = 20,96^{\circ} \pm 2,23^{\circ}$. Момент проходження перигелію $JD = 2456292,26 \pm 1,23$ (30,076 грудня 2012 р.).

Екваторіальні координати видимого радіанту (J2000.0):

$$\delta_R = 10,43^{\circ} \pm 0,79^{\circ}$$

$$\alpha_R = 325,69^{\circ} \pm 1,14^{\circ}$$

Екваторіальні координати справжнього радіанту (J2000.0):

$$\delta'_R = 17,85^{\circ} \pm 0,21^{\circ}$$

$$\alpha'_R = 26,67^{\circ} \pm 1,06^{\circ}$$

Екліптичні координати справжнього радіанту (J2000.0):

$$\beta'_R = 6,39^{\circ} \pm 0,46^{\circ}$$

$$\lambda'_R = 31,14^{\circ} \pm 0,93^{\circ}$$

Геліоцентричні орбіти Челябінського болідного тіла й астероїда 2012DA₁₄ істотно відрізняються в одночасний момент зближення їх із Землею, що говорить про різну їхню природу. На підставі результатів

модельних розрахунків автори в [107] прийшли до висновку про ймовірний генетичний зв'язок Челябінського метеороїда з астероїдом 2011 EO₄₀.

Таблиця 3.5

Параметри геліоцентричної орбіти Челябінського метеороїда.

Автор	a (a.o.)	e	i , (°)	Ω (°)	ω (°)
AMS [83]	1,66	0,52	4,05	326,43	116,0
Borovicka et al. [94]	1,55 ±0,07	0,50 ±0,02	3,6 ±0,7	326,41	109,7 ±1,8
Borovicka et al. [95]	1,72 ±0,02	0,571 ±0,006	4,98 ±0,12	326,459 ±0,001	107,67 ±0,17
Dmitriev et al. [110]	1,76 ±0,04	0,580 ±0,012	5,0 ±0,3	326,454 ±0,002	108,2 ±0,7
Emel'Yanenko et al. [112]	1,88 ±0,07	0,609 ±0,017	5,9 ±0,4	326,446 ±0,002	108,9 ±0,5
Marcos et al. [105]	1,62375 ±0,00014	0,53279 ±0,00011	3,817 ±0,005	326,4090 ±0,0007	109,44 ±0,03
Marcos et al. [106]	1,624765 ±0,000005	0,53184 ±0,00001	3,97421 ±0,00005	326,44535 ±0,00001	109,71442 ±0,00004
Proud [181]	1,47 ^{+0.03} _{-0.13}	0,52 ^{+0.01} _{-0.05}	4,61 ^{+2.58} _{-2.09}	326 ^{+0.01} _{-0.0}	96,58 ^{+2.94} _{-1.72}
Zuluaga & Ferrin [218]	1,73 ±0,23	0,51 ±0,08	3,45 ±2,02	326,70 ±0,79	120,62 ±2,77
Zuluaga et al. (2013) [219]	1,27 ±0,05	0,44 ±0,02	3,0 ±0,2	326,54 ±0,08	95,1 ±0,8
Zuluaga et al. ⁽¹⁾	1,368 ±0,006	0,470 ±0,010	4,0 ±0,3	326,479 ±0,003	99,6 ±1,3
Popova et al. [177]	1,76 ±0,08	0,581 ±0,009	4,93 ±0,24	326,4422 ±0,0014	108,3 ±1,9
Golubaev [23], дисертаційна робота	1,67 ±0,10	0,57 ±0,03	7,07 ±0,54	326,42	106,28 ±2,54
Marcos et al. [107]	1,62470348 ±0,00000005	0,53184268 ±0,00000002	3,9749908 ±0,0000008	326,4607324 ±0,0000014	109,7012184 ±0,0000008
2012 DA ₁₄	0,91	0,089	11,61	146,996	195,54
2011 EO ₄₀	1,6540887	0,54016233	3,36286	50,30284	17,07473

Існують ситуації, коли знаючи елементи геліоцентричної орбіти метеороїда, ми можемо визначити не тільки ймовірність зіткнення його із

¹¹ Значення наводяться в [107, табл. 1] з посиланням на <http://astronomia.udea.edu.co/chelyabinsk-meteoroid/>

Землею, але й досить точно визначити час і місце падіння фрагментів на земну поверхню. Наприклад, за допомогою програмного забезпечення “Find_Orb”⁽¹²⁾ його автори за астрометричними спостереженнями (6 - 7 жовтня 2008 року проведено 783 спостережень на часовому інтервалі 10,8 годин) змогли розрахувати точні елементи орбіти й обставини падіння на земну поверхню фрагментів астероїда 2008 TC₃.

Для перевірки астрономічної обставини вторгнення Челябінського болідного тіла в атмосферу Землі, на жаль, такий підхід не прийнятний. Головна причина полягає у вкрай малому часовому інтервалі (десятки секунд), для якого проводиться астрометричний супровід метеороїда у земній атмосфері. До того ж, спостереження проводилися в денний час доби, з поганою часовою прив'язкою і за допомогою недослідженої оптики, що істотно знижує якість астрометричних даних, по яких визначаються геліоцентричні елементи орбіти метеороїда. Для такого випадку необхідно шукати більш прийнятні методи.

Але перевірити надійність оцінки геліоцентричної орбіти Челябінського болідного тіла можливо методами метеорної астрономії. Для цього, згідно заявленим у даній роботі елементам орбіти, були обчислені ймовірні теоретичні радіанти в 2013 році (табл. 3.6). Модельні розрахунки проведені за допомогою програми “Metrad”, що докладно описана в [167]. Теоретичний радіант розраховується шістьма різними методами. Для оцінки вірогідності обчисленого радіанта використовується D-Критерій Саутворта-Хокінса [197].

Автори вказують, що найбільш впевнено спостережувані радіанти мають $D < 0,5$. Згідно табл. 3.6 із дванадцяти варіантів можлива реалізація теоретичного радіанта тільки 15,1 лютого ($D \sim 0,000$). У цьому випадку, мінімальна відстань між орбітами Землі і метеороїда може становити порядку 0,0001 а.о. Сферичні екваторіальні координати теоретичного

¹² http://www.projectpluto.com/find_orb.htm

радіанта ($\delta_R = 3,7^\circ$; $\alpha_R = 330,2^\circ$) близькі за значеннями до екваторіальних координат видимого радіанту Челябінського метеороїда відповідно до вище проведених обчислень: ($\delta_R = 10,43^\circ \pm 0,79^\circ$; $\alpha_R = 325,69^\circ \pm 1,14^\circ$).

Таблиця 3.6

Модельні розрахунки теоретичних радіантів в 2013 році (на епоху J2000.0), для геліоцентричної орбіти Челябінського болідного тіла. Методика і програмне забезпечення “Metrad” [167].

Метод	α_R	δ_R	V_G	V_H	λ_0	Дата максимуму		D
-Q	340,6	-19,8	17,83	32,39	146,4	Серп.	19,4	0,188
-B	341,6	-21,8	15,08	31,28	146,4	Серп.	19,4	0,165
-W	326,9	-28,5	15,68	35,08	146,4	Серп.	19,4	0,292
-A	356,8	-17,2	15,49	35,27	177,3	Верес.	20,3	0,065
-H	355,5	-15,8	15,39	35,27	176,8	Верес.	19,8	0,062
-P	352,9	-13,1	15,43	35,26	175,4	Верес.	18,4	0,068
Q+	330,2	3,7	15,52	35,69	326,4	Лют.	15,1	0,000
B+	330,2	3,7	15,51	35,68	326,4	Лют.	15,1	0,000
W+	330,2	3,7	15,51	35,69	326,4	Лют.	15,1	0,001
A+	330,2	3,7	15,51	35,69	326,4	Лют.	15,1	0,000
H+	330,2	3,7	15,51	35,69	326,4	Лют.	15,1	0,000
P+	330,2	3,7	15,51	35,69	326,4	Лют.	15,1	0,000

Для порівняння розглянемо значення радіанта Челябінського боліда: відповідно до результатів [94] координати радіанта становлять ($\delta_R = 8,0^\circ \pm 1,0^\circ$; $\alpha_R = 328,6^\circ \pm 1,0^\circ$), а в роботі [177] приводиться значення ($\delta_R = 7,26^\circ \pm 0,10^\circ$; $\alpha_R = 328,62^\circ \pm 0,09^\circ$).

3.7.9. Місце падіння на земну поверхню метеоритного фрагмента, спостережуваного на кінцевій стадії боліда.

Обчислимо геодезичні координати падіння на земну поверхню залишкового метеоритного фрагмента (C_3 , на рис. 3.12). Існують безліч фізичних явищ і параметрів, що впливають на рух болідного тіла і визначальне місце його падіння на земну поверхню. У числі таких явищ або параметрів можна назвати: інтенсивна дефрагментація тіла, опір атмосферного повітря, вітровий знос, залежність руху від форми й шорсткості поверхні тіла. Більші фрагменти одержують бічну швидкість при дробленні [172, 84]. Бічну швидкість може додати й обертання [85]. Модельні розрахунки дозволяють досить добре описати рух болідного тіла. Наприклад, методика модельних розрахунків з урахуванням аеродинамічних властивостей описана в монографії [73]. Але багато із зазначених характеристик важко визначити безпосередньо зі спостережень. Для такого випадку необхідно шукати більш прийнятні методи оцінки геодезичних координат місця падіння. Нижче описується один з таких способів.

З одного боку, область падіння визначається границями похибки в розрахунках проекції траєкторії на земну поверхню (рис. 3.18). Крайні значення цих границь формуються за рахунок зміщення або розвороту лінії траєкторії в межах похибок її вимірювання. У районі оз. Чебаркуль зазначена невизначеність у лінійному масштабі становить $\pm 3,7$ км щодо обчисленої траєкторії. З іншого боку, границі невизначеності місця падіння уздовж траєкторії залежить від точності розрахованих значень кінематичних параметрів і обраною моделлю руху метеороїда в атмосфері Землі.

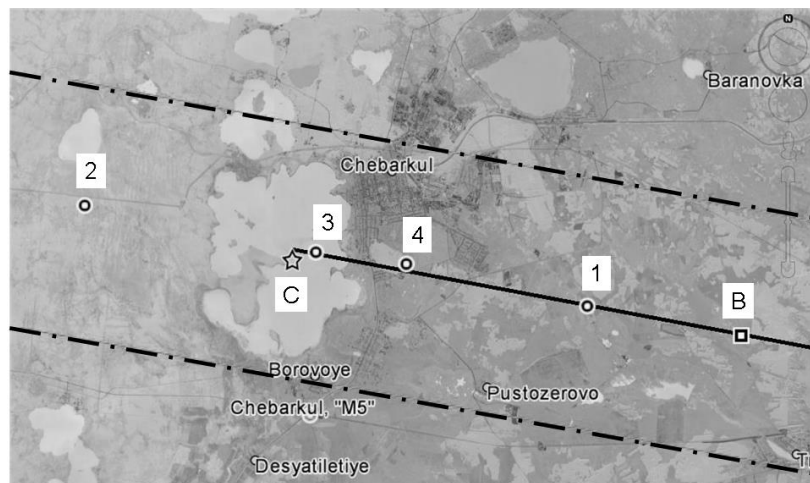


Рис. 3.18. До розрахунку місця падіння на земну поверхню фрагмента, болідного тіла (C_3 , на рис. 3.12) після припинення світіння в момент руху зі швидкістю $2,27 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$ у пункті (В). Штрихпунктирні лінії – межі невизначеності в розрахунках проєкції траєкторії на земну поверхню (в області оз. Чебаркуль $\pm 3,7 \text{ км}$). Позначення відповідають нумерації в табл. 3.7.

На графіку (рис. 3.17) значень швидкостей (V) руху болідного тіла залежно від геодезичних координат (λ і φ) розглянемо кінцевий відрізок польоту боліда після початку максимального гальмування. Складемо залежність координати λ (геодезична довгота) від швидкості V . Далі, проведемо лінійну апроксимацію складеної залежності у вигляді:

$$\lambda(V) = zV + m, \quad (3.89)$$

де z і m – деякі коефіцієнти, V – швидкість болідного тіла в точці з координатою λ по геодезичній довготі. Якщо прийняти $V = 0$, тоді геодезична довгота місця падіння $\lambda_{\text{impact}} = \lambda(0) = m$. Аналогічно шукаємо геодезичну широту місця падіння (φ_{impact}).

Результати оцінки координат місця падіння болідного тіла (C_3) за спостереженнями із двох пунктів Каменськ-Уральський¹ і Єкатеринбург (I)² наведені в табл. 3.7. Там же приведені геодезичні координати місця знахідки найбільшого фрагмента ($\sim 650 \text{ кг}$). Лінійна відстань (ΔL) між обчисленим місцем падіння і місцем знахідки фрагмента дає можливість оцінити точність

методу. Так, при обчисленні місця падіння залишкового фрагмента за спостереженнями з одного пункту спостереження (наприклад, Каменськ-Уральський¹ або Єкатеринбург (I)²) відхилення щодо реального місця виявлення фрагмента приблизно 9 і 6 км відповідно. Якщо об'єднати вихідні дані із цих пунктів спостережень, тоді ΔL порядку 1 км. Для порівняння в табл. 3.7 приведені координати місця падіння обчислених за вихідним даними згідно [177, см. табл. S1]. Відхилення ΔL , у цьому випадку, становить 3 км.

Таблиця 3.7

Оцінка координат місця випадання залишкового метеоритного фрагмента за спостереженнями кінцевої стадії боліда на підставі вихідних даних відображених на (рис. 3.17). Нумерація відповідає позначенням на (рис. 3.18); ΔL - відстань між обчисленим і реальним місцем розташування знайденого фрагмента (оз. Чебаркуль).

<i>№ п\п</i>	<i>Пункт спостережень</i>	<i>λ, E</i>	<i>φ, N</i>	<i>ΔL (км)</i>
1	Каменськ-уральський ¹	60°27'28,8"	54°56'52,8"	8,9
2	Єкатеринбург (I) ²	60°13'30,0"	54°58'26,4"	6,3
3	Спільно (1 і 2)	60°19'55,2"	54°57'43,2"	0,8
4	По даним [177] (табл. S1)	60°22'26,4"	54°57'32,4"	3,1
С	Місце розташування фрагмента (~650 кг, оз. Чебаркуль)	60°19'14,58"	54°57'34,80"	-

Таким чином, метеоритні фрагменти необхідно шукати в районі пункту з геодезичними координатами:

$$\lambda_{\text{impact}} = 60^{\circ}19'55''\text{E}$$

$$\varphi_{\text{impact}} = 54^{\circ}57'43''\text{N}$$

Ці координати і розраховані на основі необхідних параметрів опублікованих в [177], близькі до значень координат місця знахідки самого масивного метеоритного осколка в оз. Чебаркуль. Очевидно, що похибка в розрахунках місця розташування падіння фрагмента визначається тільки похибками вимірювання координат і швидкості. Більше того, запропонована методика дозволяє контролювати надійність результату.

3.8. Апробація методики обчислення кінематичних параметрів метеорних тіл за базисними спостереженнями в телевізійному режимі і результати.

У табл. 3.8 представлено приклад обчислених елементів геліоцентричної орбіти метеорної частинки зафіксованої одночасно на острові Зміїний (№ 0001) і в Крижанівці (№ 0326) за спостережними параметрами, розміщених у додатку (табл. В, метеор №1). Бачимо гарне узгодження елементів орбіти метеора з елементами геліоцентричної орбіти комети 109P/Swift-Tuttle під час двох повернень її до Сонця. Таким чином, можемо зробити висновок про приналежність метеорної частинки до потоку Персеїди, генетично пов'язаного з кометою 109P/Swift-Tuttle.

Для перевірки працездатності створеного автором програмного забезпечення для обчислення атмосферних кінематичних параметрів і елементів геліоцентричної орбіти метеорного тіла за спостереженнями із двох віддалених кореспондуючих пунктів використовувалися спостереження інших авторів. Так, в 2008 році відбулася унікальна астрономічна подія – падіння у вигляді метеоритного дощу Almahata Sitta [191] на поверхню Землі астероїда 2008 TC₃, що був виявлений за 19 годин до зіткнення (6 жовтня 2008 року в 6^h39^m UTC). Астрометричні спостереження дали можливість із великою точністю визначити елементи геліоцентричної орбіти астероїда,

обчислити ефемериди умов зіткнення його із Землею й підготуватися до наземних спостережень боїда.

Таблиця 3.8

Значення елементів орбіт комети 109P/Swift-Tuttle і метеорної частинки зафіксованої базисним способом у Крижанівці (№ 0326) і на острові Зміїний (№ 0001). Кутові елементи дані на епоху (J2000.0).

	109P/Swift-Tuttle		Метеорна частинка
T_p	1862 Серпень 23,4229	1992 Грудень 12,3241	2010 Липень 19,244
α_R , (°)	45,9	45,9	41,79 \pm 2,05
δ_R , (°)	57,6	57,7	56,48 \pm 2,05
ω , (°)	152,77	153,00	150,41 \pm 3,82
Ω , (°)	139,371	139,444	136,305
i , (°)	113,5664	113,4265	112,35 \pm 2,68
e	0,962798	0,963589	0,81 \pm 0,10
q , (а.о.)	0,962658	0,958220	0,94 \pm 0,02

Розв'язання зворотного завдання: за результатами спостережень боїда відновити основні кінематичні характеристики і геліоцентричну орбіту метеороїда, дозволяє оцінити працездатність методу й створеного відповідного програмного забезпечення (умовно позначимо "ВМ"). У табл. 3.9 представлена орбіта астероїда 2008 TC₃ на основі астрометричних

спостережень JPL [137]⁽¹³⁾, [82]. У цій же таблиці розміщені результати розрахунку геліоцентричної орбіти метеороїда по реконструкції його руху в земній атмосфері [134].

Таблиця 3.9

Порівняння обчислених параметрів геліоцентричної орбіти астероїда 2008 TC₃, що випав на поверхню Землі 7 жовтня 2008 р. (елементи орбіти згідно JPL (2008 TC₃) наведені на епоху J2000.0).

	"BM"	JPL [137]	[134]	$\pm\Delta$ (%) "BM" – JPL [137]	$\pm\Delta$ (%) "BM" – [134]	$\pm\Delta$ (%) [134] – JPL [137]
<i>a</i> , (а.о.)	1,270	1,308201	1,262	1,5	0,3	1,8
<i>q</i> , (а.о.)	0,919 \pm 0,005	0,899957	0,909	1,1	0,6	0,5
<i>E</i>	0,276 \pm 0,006	0,312065	0,28	5,7	0,7	5,7
<i>i</i> , (°)	2,244 \pm 0,08	2,5422	2,298	5,9	1,2	5,3
ω , (°)	234,065 \pm 1,113	234,44897	234,202	0,1	0,03	0,1
Ω , (°)	194,212	194,10114	194,084	0,03	0,03	0,004
<i>T_p</i> , (2008 Листопад)	21,118 \pm 0,633	20,3989	-	1,8	-	-

Між собою зрівнювалися результати розрахунків:

1. "BM" – JPL [137];
2. "BM" – [134];

¹³ JPL <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2008TC3;cad=1>

3. JPL [137] – [134].

У всіх випадках для "ВМ" вихідні дані бралися з [134]. Відносні відхилення в елементах орбіт обчислених у дисертаційній роботі від результатів інших авторів представлені у відсотках. Видно, що кінцеві результати можна вважати співпадаючими.

Другим прикладом для перевірки методики і працездатності програмного забезпечення "ВМ" є Челябінський болід 15 лютого 2013 року. У першому рядку табл. 3.10 наведені елементи геліоцентричної орбіти метеороїда опубліковані в [177]. Так само, на підставі початкових даних зазначеної публікації були обчислені елементи орбіти за допомогою програмного забезпечення "ВМ" (другий рядок, табл. 3.10). І в цьому випадку, кінцеві результати можна вважати співпадаючими.

Таблиця 3.10

Порівняння обчислених параметрів геліоцентричної орбіти Челябінського метеороїда (результати наведені на епоху J2000.0).

Автор	Q (а.о)	q (а.о)	a (а.о)	e	i (°)	Ω (°)	ω (°)	T_p (2012)
[177]	2,78 $\pm 0,20$	0,739 $\pm 0,020$	1,76 $\pm 0,16$	0,581 $\pm 0,018$	4,93 $\pm 0,48$	326,4422 $\pm 0,0028$	108,3 $\pm 3,8$	Грудень 31,9 $\pm 2,0$
"ВМ" (початкові дані бралися з [177])	2,778 $\pm 0,009$	0,738 $\pm 0,001$	1,758 $\pm 0,005$	0,580 $\pm 0,001$	5,036 $\pm 0,022$	326,607	106,27 $\pm 0,2$	Грудень 30,73 $\pm 0,088$

3.9. Результати позиційних спостережень метеорів у серпні 2010 і 2011 роках у Крижанівці (Одеса) і на острові Зміїний.

У додатку (табл. А, В, С) представлені результати обчислення атмосферних кінематичних параметрів і елементів геліоцентричних орбіт

метеорних частинок, зафіксованих під час базисних спостережень у серпні 2010 і 2011 роках у Крижанівці (Одеса) і острові Зміїний. У цих же таблицях наведені погрішності відповідних величин. З десяти базисних метеорів – 3 метеори належать метеорному потоку Персеїди, 7 метеорів є спорадичними. Серед спорадичних метеорних тіл два належать близькосонячній області. Так, метеорне тіло № 6 відноситься до близькосонячних (sungrazers), з перигелійною відстанню $q = 0,035 \pm 0,011$ а.о.; № 9 – належить до метеорного комплексу Мачхольца (Machholz Interplanetary Complex), у цього метеорного тіла $q = 0,121 \pm 0,005$ а.о. на геліоцентричній орбіті.

Аналіз погрішностей кінематичних параметрів метеорних тіл (див. у Додатку табл. А, В, С) показує, що: похибка визначення метеорної траєкторії на небесній сфері $\sim 10'' - 12''$; похибка обчислення полюса великого кола метеорної траєкторії $\sim 3' - 13'$; похибка визначення радіанта метеора $\sim 0,5^\circ - 1,5^\circ$; обчислена похибка атмосферної швидкості не гірше 3%.

Таким чином, створена спостережна апаратура, розроблена методика спостережень і обробки спостережного матеріалу дозволяє визначати з високою точністю атмосферні і позаатмосферні кінематичні параметри метеорного тіла за спостереженнями із двох віддалених пунктів (з відстанню до ~ 150 км між кореспондуючими пунктами).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.

1. Розроблено методику й відповідне програмне забезпечення для розрахунку основних атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів метеорів за спостереженнями із двох віддалених пунктів (з відстанню ~ 150 км між кореспондуючими пунктами).

2. Запропоновано спосіб вимірювання положення зображення метеорного тіла на телевізійному кадрі в певний момент часу при спостереженнях у режимі роботи телевізійної камери з черезрядковим розгорненням формування відеокадрів.

3. Проведено позиційну обробку спостережного матеріалу, отриманого під час базисних (152,7 км) спостережень у Крижанівці (Одеса) і на острові Зміїний (Одеська область) у серпні 2010 і 2011 роках. Отримано кінематичні параметри руху спостережених метеорних тіл у земній атмосфері, а також їхні елементи геліоцентричної орбіти. Серед зафіксованих метеорних тіл виявлені метеороїди з близькосонячної області.

4. Виявлено, що метеорний патруль в Одесі й метод обробки спостережного матеріалу забезпечує: похибку визначення метеорної траєкторії на небесній сфері $\sim 10'' - 12''$; похибка обчислення полюса великого кола метеорної траєкторії $\sim 3' - 13'$; похибка визначення радіанта метеора $\sim 0,5^\circ - 1,5^\circ$; обчислена похибка атмосферної швидкості не гірше 3%.

5. Розроблено методика для обчислення основних кінематичних параметрів метеоритообразуючих болідів, що спостерігались у світлий час доби. Метод застосований для обчислення атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів Челябінського метеороїда під час його падіння на поверхню Землі 15 лютого 2013 року.

РОЗДІЛ 4. ТЕРМІЧНА ДЕСОРБЦІЯ РЕЧОВИНИ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК ПОБЛИЗУ СОНЦЯ. АНАЛІЗ ДАНИХ ТА ЇХНЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ.

У даній главі проведений статистичний і кількісний аналіз бази даних спостережень метеорів з метою виявлення ефектів теплового впливу Сонця на фізико-хімічні властивості метеороїдів. Розглядається питання про умови необхідні для виявлення близькосонячних спорадичних метеороїдів під час спостережень метеорів із поверхні Землі.

4.1. Пилова речовина на геліоцентричних відстанях менше 0,1 а.о. від Сонця.

Одним із класів небесних тіл, які несуть потенційну загрозу в навколосонячному просторі, є т.зв. “дряпаючі Сонце” комети (Sun-grazing comets) або SOHO-комети. При зближенні із Землею небезпечні як самі комети [72], так і утворені в результаті їх дефрагментації поблизу Сонця пил і великі уламки. Нижче буде показано, що такі метеороїди мають радіанти поблизу сонячної й антисонячної області неба при вльоті в земну атмосферу.

У сучасній метеорній астрономії ще немає короткого терміну для чіткого визначення метеороїдів генетично пов'язаних з Sun-grazing кометами. Тому надалі, у зв'язку зі сталою практикою, майже параболічні (період $P > 200$ років) комети і метеороїди з перигелійними відстанями їхніх орбіт $q < 0,1$ а.о., будемо називати короткоперигелійними. Також для стислості, будемо називати такі тіла “близькосонячними”, у сенсі близькості їхніх перигеліїв до Сонця.

Важливо знати особливості кінематичних і фізичних характеристик таких близькосонячних метеороїдів. У четвертому розділі розглянуті деякі фізичні й кінематичні властивості близькосонячних спорадичних метеороїдів і особливості пов'язаних з ними метеорів. Але, насамперед, у короткій формі звернемося до історії вивчення пилового компонента поблизу Сонця,

визначимо джерела її поповнення в навколосонячну область і існуючі методи вивчення близькосонячних пилових частинок.

4.1.1. Властивості метеороїдного фону поблизу Сонця.

Задовго до дослідження міжпланетного простору космічними апаратами, Жанссен (Janssen) [133] вивчив спектрограми сонячної корони, що були отримані під час повного сонячного затемнення 1883 р., і зробив висновок про присутність пилових частинок в навколосонячній області. Аллен (Allen) [81] і Ван де Гулст (Van de Hulst) [209] показали, що випромінювання F-Корони формується за рахунок пилових частинок розміром 10 - 100 мкм, розташованих на відстанях більше $20 R_{\odot}$ від Сонця. Через сильну витягнутість індикатриси дифракційного розсіювання в напрямку падаючого світла на ці частинки, відсутня можливість спостережень пилу на менших відстанях у видимому діапазоні довжин хвиль. Дискретні пилові утворення в ближньому навколосонячному просторі стали можливими для спостережень в ІЧ-діапазоні довжин хвиль. Петерсон (Peterson) [174] теоретично обґрунтував наявність емісійних кілець нагрітого пилу на відстані порядку $4 R_{\odot}$ від Сонця. Пізніше ці кільця були знайдені на передбаченій відстані в діапазоні довжин хвиль від 2 до 10 мкм [156, 175]. Вдалим виявився метод реєстрації за допомогою інтерферометричного приладу на базі еталона Фабрі-Перо резонансного випромінювання атомів і низькозарядних іонів (наприклад, лінії іонізованого кальцію H і K), утворених при сублімації пилових частинок. Таким методом було визначено [123] присутність емісійних деталей дискретно локалізованого пилу в інтервалі геліоцентричних відстаней 5 - $20 R_{\odot}$. У цей час є підстави вважати, що ці утворення є продуктом руйнування близькосонячних комет [192].

Сучасні дослідження за допомогою Large Angle and Spectrometric Coronagraph встановленого на Solar and Heliospheric Observatory (SOHO/LASCO) та Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) показали

постійну присутність короткоперигелійних ($q < 0,1$ а.е.) комет, які повністю руйнуються в близькосонячній області. Чи є ці комети джерелом поповнення пилових частинок у міжпланетний простір? Фізичні умови близькосонячної області такі, що на перший погляд, не слід очікувати виживання фрагментів дезінтеграції комет цієї групи, і тим більше, пилових частинок. Приладами Heliospheric Imager cameras (HI) та STEREO/WAVES (SWAVES), установлених на космічних апаратах STEREO-A і STEREO-B, на геліоцентричній відстані 1 а.о. були зафіксовані потоки пилових наночастинок розміром 1 - 10 нм. Вважається [159, 160, 103], що вони були викинуті зі швидкостями близькими до швидкості сонячного вітру з геліоцентричних відстаней порядку 0,15 а.о. Одним з важливих результатів досліджень за допомогою космічного апарата *Ulysses* є виявлення великої кількості пилу (β -метеороїди), що утворився на відстанях менше 0,5 а.о. від Сонця [212]. У середньому на високих екліптичних широтах реєструється 0,3 частинки за добу, а у внутрішній Сонячній системі до 1,5 реєстрацій за добу. За оцінками, маси пилових частинок становлять порядку $10^{-16} \leq m \leq 10^{-7}$ г.

Блиькосонячні пилові частинки, досягаючи Землі, можуть проявлятися у вигляді метеорів (надалі, для стислості такі частинки будемо називати метеорними частинками, метеорними тілами або метеороїдами). Таким чином, існує ще одна можливість вивчення близькосонячної пилової речовини методами метеорної астрономії.

4.1.2. Близькосонячні комети і генетично пов'язані з ними метеороїдні потоки.

Неодноразово ставилося питання про походження метеороїдних потоків, орбіти яких мають малі перигелійні відстані. Наприклад, у роботі [64] розглядалося питання про велику кількість метеороїдних потоків з невеликими розмірами орбіт ($a \leq 2$ а.о.) і дуже малими перигелійними відстанями ($0,01 \leq q \leq 0,2$ а.о.), для яких не були відомі комети-

родоначалниці. Автор вважав, що комети можуть переходити на такі орбіти з орбіт більших розмірів під дією реактивного гальмування в процесі випару їхніх крижаних ядер. Надалі, виявилось, що елементи орбіти навколосонячної комети 96P/Мачхольца (96P/Machholz) ($q = 0,12$ а.о., $i = 60^\circ$, $e = 0,96$) у результаті так званого резонансу Козаї [147] відчують сильні коливання. Так, наприклад, нахил орбіти комети еволюціонує від 12° до 80° , а перигелійна відстань може досягти 1 а.о. [163, 122, 213]. Таким чином, значна частина міжпланетного простору буде заповнена пиловими частинками зазначеної комети. У роботі [189] показано можливість генетичного зв'язку деяких потоків: Південні δ -Аквариди, Північні δ -Аквариди, Денні Арієтиди, α -Цетиди, Квандрантиди, Урсиди, Кариніди, к-Веліди з близькосонячними кометами. Зокрема, перераховані потоки і кілька інших об'єктів Сонячної системи (наприклад, астероїд 2003 EH₁ і комету C/1490Y1) пропонується розглядати як члени міжпланетного комплексу пов'язаного з кометою 96P/Мачхольца (*Machholz Interplanetary Complex*). Досить упевнений висновок про генетичний зв'язок комет сімейства Марсдена з потоком Арієтиди зроблено в роботі [120].

При аналізі метеорних спостережень відзначається тенденція до угруповань орбіт метеороїдів з малими перигелійними відстанями до угруповань. Так, в [132] виділено 88 асоціацій. У більшості випадків, вони являють собою щось середнє між спорадичним матеріалом і потоками. Згідно [98] за радіоспостереженнями (2002 - 2006 років) було зафіксовано більше 2,5 мільйонів частинок з масами $\sim 10^{-7}$ кг. Застосовувана в дослідженнях методика дозволила виділити 12 нових потоків. Дослідження показало, що більше 90% всіх зареєстрованих частинок належать спорадичному фону. Істотна кількість пилових частинок мають орбіти з перигелійними відстанями $q < 0,15$ а.о. Автори прийшли до висновку, що близькосонячні комети є потужними постачальниками метеороїдів в атмосферу Землі.

Зокрема, були виділені нові метеороїдні потоки з орбітальними елементами практично ідентичними кометі 96P/Мачхольца.

Список комет з перигелійними відстанями менше 0,1 а.о. (близькосонячні комети) постійно поповнюється. В 2015 році налічувалося більше 3000 комет, що пройшли в поле зору SOHO/LASCO і STEREO. У дисертаційній роботі використовувався каталог елементів орбіт цих комет⁽¹⁴⁾. По орбітальних характеристиках розрізняють чотири сімейства близькосонячних комет (табл. 4.1): Крейца (Kreutz), Майера (Meyer), Марсдена (Marsden), Крахта (Kraich). Крім цього, спостерігаються інші комети з $q < 0,12$ а.о., але, по орбітальних характеристиках їх не можна зарахувати до кожної із зазначених груп. Такі комети можна назвати спорадичними.

Таблиця 4.1

Середні значення елементів орбіт близькосонячних комет.

Кометна група	q (а.о.)	a (а.о.)	e	ω (°)	Ω (°)	i (°)	Період, (роки)
Крейца	0,005	>50	>0,9999	82,2	3,2	144,6	500-1000
Майера	0,035	-	1,0	57,3	73,5	72,1	невідомо
Марсдена	0,05	3,1	0,984	28,1	81,6	26,0	~ 6
Крахта	0,05	3,1	0,984	60,6	43,9	13,7	~ 6

Комети сімейств Марсдена і Крахта можуть утворити рої пилових частинок, які перетинають орбіту Землі. Сучасні спостереження за допомогою SOHO/LASCO і STEREO показали, що всі комети сімейства Крейца повністю руйнуються в близькосонячній області. За весь період

¹⁴ <http://ssd.jpl.nasa.gov/dat/ELEMENTS.COMET>

спостережень відомі тільки деякі виключення, наприклад, комета C/2011 W3 (Lovejoy), що у грудні 2011 року пройшла успішно перигелій ($q = 0,0056$ а.о.). Комета C/2012 S1 (ISON) ($q = 0,0124$ а.о.) через добу після проходження перигелію (28 листопада 2013 року) втратила в блиску й спостерігалася у вигляді безформної газопилової хмари.

Вкрай малі значення перигелійних відстаней в орбітах комет сімейства Крейца дають підстави припустити, що пилові частинки цих комет не виживуть в близькосонячній області в результаті високого термічного впливу. У статті [159] розглядалося питання про втрату маси великих об'єктів що падають на Сонце зі швидкостями вільного падіння. Темпи втрати маси розраховувалися з використанням моделі аналогічної тим, які застосовуються для опису абляції метеороїдів під час їхнього руху в атмосфері Землі. Автори показали, що більша частина маси об'єкта сублимує у вузькому діапазоні відстаней від Сонця. Наприклад, тіло (металеве або силікатне) масою 1 кг наближаючись до Сонця з геліоцентричних відстаней $4 R_{\odot}$ уже на відстані $1,5 - 2 R_{\odot}$ буде мати масу 10^{-10} кг. Таким чином, метеороїдні потоки з перигелійними відстанями менше 0,02 а.о. повинні бути малоймовірні. Тим часом, у каталогах орбіт метеороїдів часто зустрічаються значення перигелійних відстаней на один або два порядки менше. Чи є такі значення помилково обчисленими? Щоб відповісти на це питання необхідно розглянути точності елементів орбіт метеороїдів у даних каталогах.

4.2. Прояв ефекту теплового впливу Сонця на метеороїди в їхньому розподілі по перигелійних відстанях.

На рис. 4.1 представлена діаграма перигелійна відстань (q) – нахил (i) для метеорних тіл каталогу SNM і комет. У побудові графіка використовувалися дані про близькосонячні комети і метеороїди з $q < 0,16$ а.о. незалежно від приналежності до потоків або спорадичному фону. На цій діаграмі можна виділити наступні особливості:

1. По нахилу орбіт метеороїди групуються в областях порядку 20° і 140° , що відповідає нахилу орбіт комет сімейств Крейца, Марсдена й Крахта.

2. Метеороїди з нахилом орбіт подібними до нахилу орбіт комет сімейства Майера нічим не виділяються серед всієї сукупності.

3. Найбільша кількість метеороїдів мають нахили орбіт подібні до нахилу орбіт комет сімейств Марсдена і Крахта.

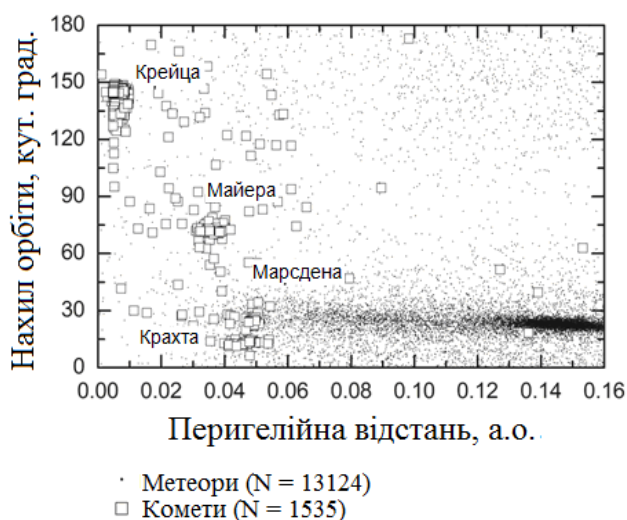


Рис.4.1. Діаграма перигелійна відстань (q) – нахил орбіт (i) для метеороїдів каталогу SNM (2007 – 2015 рр.) і близькосонячних комет.

На рис. 4.2 наведені розподіли окремо для поточкових і спорадичних метеорних тіл каталогу SNM по перигелійних відстанях ($0 < q < 1,1$ а.о.). Звертає на себе увагу максимум близько 1 а.о. (А, на рис. 4.2а, б). Відомо, що ймовірність зустрічі із Землею метеороїдів з різними орбітами неоднакова (так звана астрономічна селекція). Питання про ймовірність зустрічі із Землею метеороїдів, залежно від елементів геліоцентричної орбіти, розглядалося Епіком (Örik) [171]. Для зазначеної ймовірності (P_3) він одержав вираз:

$$\frac{1}{P_3} = \frac{\pi V_g \sin i}{R_T^2 V_\infty^2} \left(2 - \frac{1}{a} - p\right)^{1/2},$$

де R_T - радіус Землі, $p = a(1 - e^2)$ – параметр орбіти, V_g і V_∞ – геліоцентрична і позаатмосферна швидкості метеорного тіла.

Із зазначеного виразу випливає, що ймовірність зустрічі найбільш велика для метеороїдів, у яких відстань у перигелії близько до 1 а.о. Аналогічного висновку можна прийти й щодо геліоцентричних відстаней в афелії. Цим пояснюється максимум близько 1 а.о. (А, на рис. 4.2а, б).

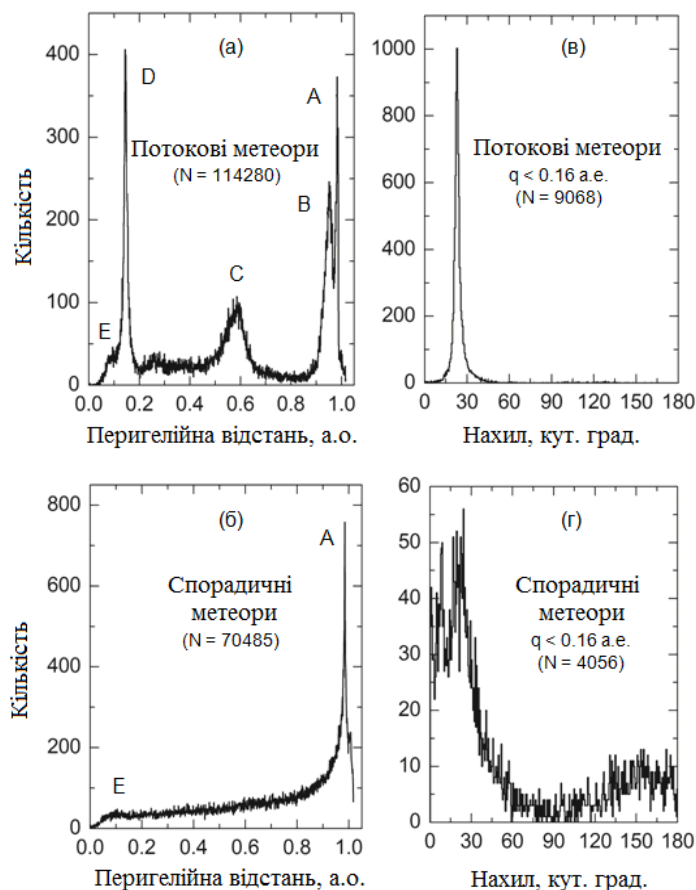


Рис. 4.2. Розподіл по перигелійним відстаням і нахилу орбіт (а, б) – потокових метеороїдів; (г, г) – спорадичних метеороїдів ($q < 0,16$ а.о.).

Зі зменшенням значень геліоцентричних відстаней, виділяються області з концентраціями перигеліїв орбіт метеороїдів, що входять до складу потужних потоків і асоціацій (В, С, D, на рис. 4.2а). У розподілі по перигелійних відстаням спорадичних метеороїдів аналогічних областей не спостерігається (рис. 4.2б). У діапазоні перигелійних відстаней $0 < q < 0,1$ а.о. (інтервал E, рис. 4.2а, б) відбувається різке зменшення чисельності потокових і спорадичних метеороїдів. На більш детальній діаграмі (рис. 4.3) точці E відповідає геліоцентрична відстань $\sim 0,08$ а.о., з якого починається зменшення чисельності частинок при наближенні до Сонця. Аналогічне відносне

зменшення в чисельності метеороїдів з $q < 0,1$ а.о. відзначається за радіолокаційними спостереженнями метеорів до $+12^m$ (наприклад, див. рис. 16 в [51]).

Яким-небудь видом селекції цей факт важко пояснити. Можливо, чисельність метеороїдів у цій зоні визначена фізичними умовами поблизу Сонця. Так, на прикладі 11 близькосонячних комет в [188] показано, що пік пилоутворення комет відбувається на відстанях $\sim 20 - 30 R_{\odot}$ від Сонця, після чого пилоутворення істотно й різко скорочується. Аналогічний висновок зроблений на підставі фотометричних досліджень 900 кривих блиску комет сімейства Крейца в [142]. Автор наголошує, що хоч не ясно де починається крутий підйом на кривій яскравості комет, але, імовірно недалеко за межами поля зору коронографа SOHO, а максимальний блиск вони досягають на відстанях порядку $20 - 30 R_{\odot}$ від Сонця.

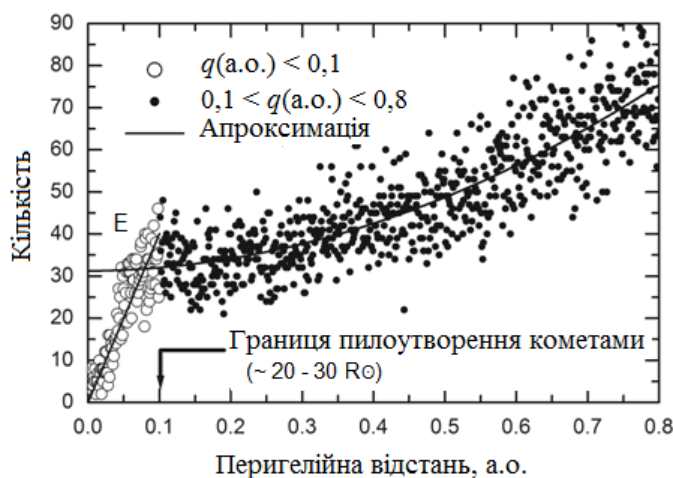


Рис. 4.3. Розподіл по перигелійних відстанях ($0 < q < 0,8$ а.о.) спорадичних метеорних тіл.

У роботі [190] автори прийшли до висновку, що геліоцентрична відстань порядку $1,8 R_{\odot}$ є граничною для повної сублімації пилових частинок близькосонячної комети C/2011 W3 (Lovejoy). Іншим прикладом руйнування близькосонячної комети є C/2012 S1 (ISON). Аналіз фотометричного й морфологічного поведіння цієї комети показав [143], що кометне ядро зруйнувалося ще до проходження перигелію ($2,67 R_{\odot}$, 28,78 листопада 2013

року). Так, пік яскравості комети припадав на 28,1 листопада ($17 R_{\odot}$). Далі яскравість швидко падала з незначним сплеском 28,6 листопада ($5 R_{\odot}$). Центральна конденсація комети зникла 28,5 листопада. Таким чином, можна зробити висновок про існування навколосонячної зони радіусом $0,1$ а.о., усередині якої, метеороїди найбільш піддані руйнуванню. А на гістограмі по перигелійних відстанях зафіксованих у земній атмосфері пилових частинок (які є продуктами руйнування комет) - цей процес буде виглядати як різке зменшення їхньої чисельності, починаючи з геліоцентричної відстані порядку $0,1$ а.о.

Розглянемо розподіл метеороїдів по нахилу орбіт. Для пилових частинок (з перигелійними відстанями орбіт $q < 0,2$ а.о.) у метеорних потоках характерні орбіти з нахилом порядку 25° (рис. 42в). Це відповідає орбітальним характеристикам метеороїдного комплексу пов'язаного з кометами сімейств Марсдена і Крахта. Для метеороїдів спорадичного фону спостерігається абсолютно інший вид у розподілі по нахилам орбіт. Крім широкого інтервалу нахилів із максимумом близько 25° , виділяється група спорадичних частинок із широким інтервалом нахилів із максимумом близько 145° (рис. 4.2г). По перигелійних відстанях орбіти спорадичних частинок розподілені більш рівномірно (рис. 4.2б). Таким чином, пилові частинки спорадичного фону крім комет сімейств Марсдена і Крахта, у тому числі, можуть мати загальний генетичний зв'язок з кометами сімейства Крейца. Розглянуті в дисертаційній роботі пилові частинки мають елементи орбіт в основному схожі з елементами орбіт близькосонячних комет (тобто загалом не втратили генетичний зв'язок зі своїми батьківськими кометами). З іншого боку, метеороїди можуть бути пов'язані з кометами, у яких періоди обертання по орбітах досить великі (в основному, від сотень років до десятків тис. років). Це дає підставу припускати, що пилові частинки утворилися при наближенні комет-родоначальниць до перигелію вперше й раніше не піддавалися сильному тепловому впливу Сонця. Таким чином, для

оцінки ефекту термодесорбції важливо порівняти фізичні властивості частинок які зафіксовані до проходження перигелію та після проходження близькосонячної області. В останньому випадку метеороїд пройде стадію термодесорбції, тоді як у першому випадку пилова частинка тільки має зазнати тепловий вплив.

Безумовно, можна по елементах орбіт визначити положення метеорного тіла щодо перигелію в момент його фіксації метеорними патрулями. Але в дисертаційній роботі обчислювалася елонгація радіанта метеора щодо положення Сонця на небесній сфері, що також укаже: на якій частині своєї орбіти “до” або “після” проходження перигелію була зафіксована пилова частинка. Такий вибір “системи координат” прийнятий для того, щоб виключити часову (сезонну) складову або спостережну селекцію в статистичних залежностях, що може виявитися при використанні альтернативної “системи координат” – довготи висхідного вузла орбіти частинки або довготи Сонця. До того ж, елонгація радіанта метеора щодо положення Сонця на небесній сфері нам буде корисна для дослідження особливостей розподілу радіантів близькосонячних метеороїдів на небесній сфері. Елонгація (ε) радіанта метеора щодо положення Сонця на небесній сфері розраховувалася по формулі:

$$\cos \varepsilon = \cos \beta_R \cos(\lambda_{\odot} - \lambda_R),$$

де λ_R і β_R – екліптичні довгота і широта радіанта метеора, λ_{\odot} - екліптична довгота Сонця на небесній сфері в момент спостереження.

На рис. 4.4. показана залежність елонгацій радіантів спорадичних метеорних тіл (з елементами в орбітах $q < 0,3$ а.о., $e < 1$) щодо положення Сонця на небесній сфері від значень ΔJD , де ΔJD це різниця між часом (виражений в Юліанських днях) фіксації вльоту в земну атмосферу метеорного тіла ($JD_{\text{спост.}}$) і часом його проходження через перигелій ($JD_{\text{периг.}}$), тобто $\Delta JD = JD_{\text{спост.}} - JD_{\text{периг.}}$. На рисунку видно, що радіанти з елонгаціями від Сонця в інтервалі $\varepsilon > 90^\circ$ відповідають положенню метеорних тіл на своїх

орбітах до проходження перигелію, а в інтервалі $\varepsilon < 90^\circ$ - після проходження перигелію.

На рис. 4.5 представлено розподіл по елонгаціям щодо Сонця радіантів спорадичних метеороїдів з перигелійними відстанями $q < 0,1$ а.о. Як бачимо, переважну кількість близькосонячних метеороїдів зафіксовано до проходження ними перигелію ($\varepsilon \sim 120^\circ - 165^\circ$). Другий максимум належить інтервалу сонячної елонгації радіантів порядку $20^\circ - 60^\circ$, що відповідає післяперигелійній частині геліоцентричних траєкторій.

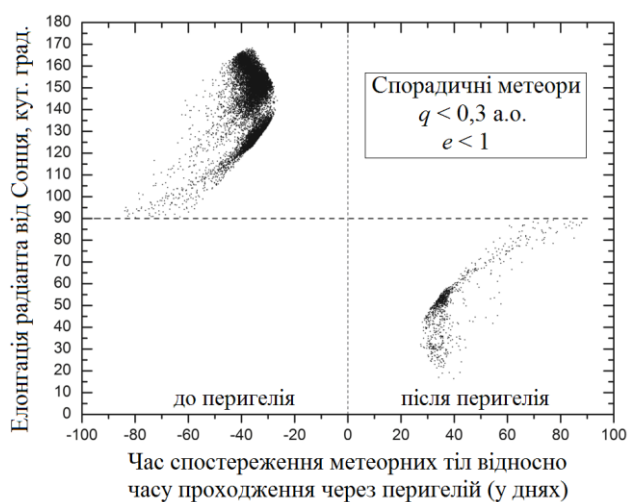


Рис. 4.4. Залежність елонгацій радіантів спорадичних метеорних тіл ($q < 0,3$ а.о., $e < 1$) щодо положення Сонця на небесній сфері від значень $\Delta JD = JD_{\text{спост.}} - JD_{\text{периг.}}$ (у днях).

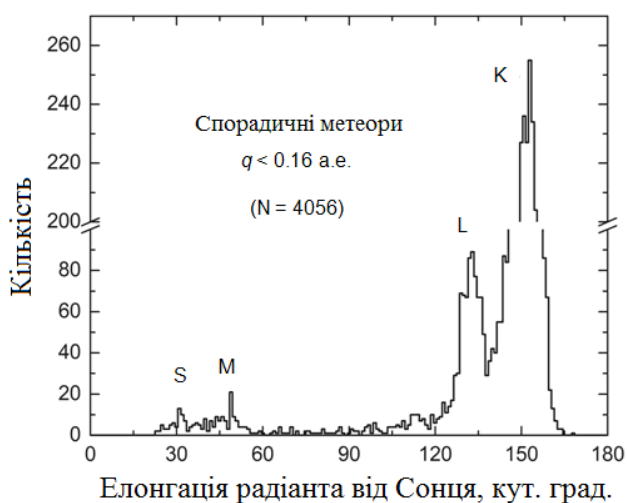


Рис. 4.5. Розподіл по елонгаціям радіантів метеорів ($q < 0,16$ а.о.) щодо положення Сонця на небесній сфері. К, L, M і S – групи радіантів.

Таким чином, маємо можливість зосередити спостереження в зазначених областях неба, де найвища ймовірність зафіксувати навколосонячні метеороїди. Якщо, у цих ділянках неба провести спектральні спостереження метеорів, породжених близькосонячними частинками, то в такому випадку, зможемо виявити прояв ефекту термодесорбції в їхньому хімічному складі. Так, наприклад, в [158] опубліковано спектральні спостереження в Іспанії (SPMN) спорадичного боліда -7^m . Перигелійна відстань метеороїда $q = 0,14 \pm 0,05$ а.о. Елонгація радіанта щодо положення Сонця на небесній сфері, згідно з наведеними даними, становить 46° (тобто частинка зафіксована після проходження перигелію). Як зазначають самі автори, у спектрі боліда спостерігається ослаблення мультиплетної лінії натрію Na1-1 (588,9 нм).

4.3. Умови, необхідні для виявлення і спостереження з поверхні Землі близькосонячних метеорних тіл.

Як було показано вище, при плануванні метеорних спостережень по фіксації близькосонячних спорадичних частинок важливо знати особливості розташування їхніх радіантів на небесній сфері і як ці особливості залежать від елементів орбіт.

По елонгаціям радіантів спорадичних метеорів щодо Сонця (рис. 4.5) кожна з “до” і “після” перигелійних областей радіантів розпадається на дві групи. Координати радіанта прямо залежать від значень елементів орбіт частинок, тому розглянемо докладніше орбіти метеороїдів, які складають кожну з груп. Розподіл по нахилам орбіт на рис. 4.6 упевнено вказує, що:

1. Група радіантів (К, на рис. 4.5) в інтервалі елонгацій $140^\circ - 165^\circ$ (з максимумом у розподілі $\sim 155^\circ$) містить орбіти з перевагою по нахилам $\sim 10^\circ - 25^\circ$ (рис. 4.6а).

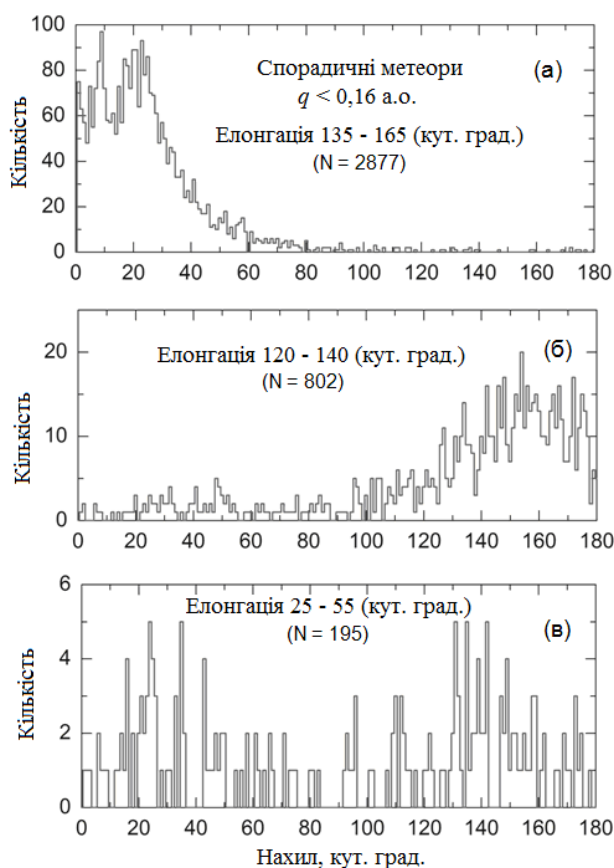


Рис. 4.6. Розподіл метеороїдів ($q < 0,16$ а.о.) по нахилам орбіт, що відповідають елонгаціям радіантів від Сонця: (а) – $140^\circ - 165^\circ$; (б) – $120^\circ - 140^\circ$; (в) – $20^\circ - 60^\circ$.

2. Група радіантів (L, на рис. 4.5) в інтервалі елонгацій $120^\circ - 140^\circ$ (з максимум у розподілі $\sim 135^\circ$) містить орбіти з перевагою по нахилам $\sim 145^\circ$ (рис. 4.6б).

3. В інтервалі елонгацій $20^\circ - 60^\circ$ виділяються дві групи радіантів (M і S, на рис. 4.5). Так, максимум у розподілі для (M, на рис. 4.5) припадає на елонгацію приблизно 50° , а для (S, на рис. 4.5) - порядку 30° . Ці групи радіантів містять орбіти з перевагою нахилів приблизно 20° і 140° (рис. 4.6в).

Таким чином, кожна із груп радіантів належить кометним сімействам (див. середні орбітальні елементи комет у табл. 4.1): (K і S, на рис. 4.5) – сімейству комет Марседена й Крахта, а (L і M, на рис. 4.5) сімейству комет Крейца.

У зв'язку з розглядом питання про умови спостережень близькосонячних метеорних тіл необхідно акцентувати увагу, що гістограма на рис. 4.5 містить прояв геометричної селекції (про врахування даного виду фактора помітності див. [66, 67]). Так, на зазначеному графіку кількість метеорних частинок, які зафіксовані після проходження перигелію, становить приблизно 5% від числа доперигелійних. З іншого боку, відповідно до цілодобових радіолокаційних спостережень відсутня помітна різниця в потоці метеороїдів із сонячної й антисонячної області неба. Такі висновки можна зробити, наприклад, на підставі опублікованих досліджень [176]. Виникає питання про причини такого розходження. Звернемося до рис. 4.7, де представлений розподіл кількості зафіксованих спорадичних метеорних тіл ($q < 0,3$ а.о.) каталогу SNM за місцевим часом спостережень, зенітних відстаней радіантів та елонгації радіантів від Сонця. Бачимо, що в нічний час доби найбільш сприятливі умови для спостережень метеорів є антисонячна область небесної сфери на відміну від навколосонячної області.

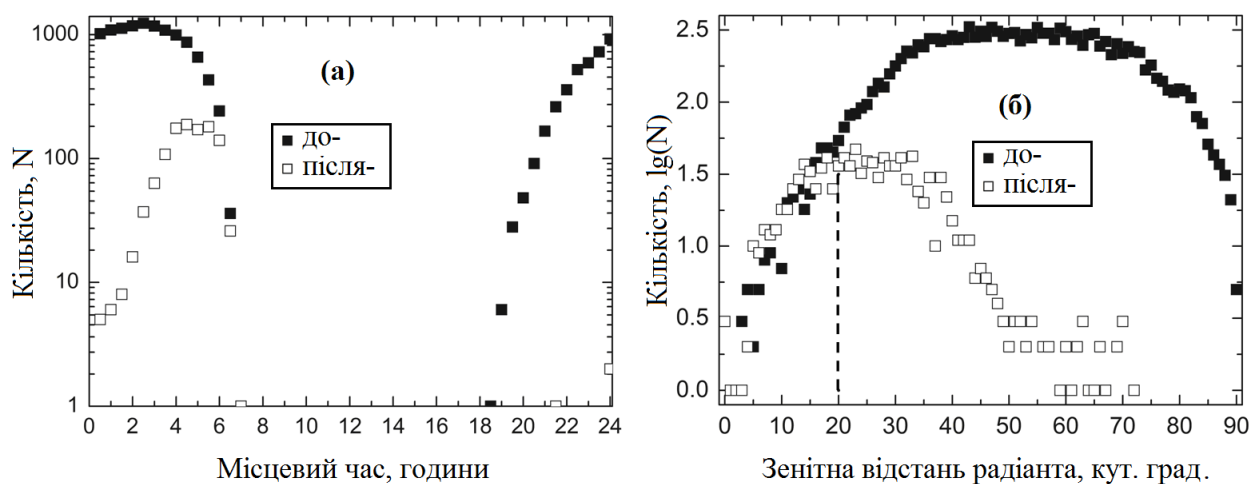


Рис. 4.7. Розподіл для спорадичних метеорних тіл ($q < 0,3$ а.о.) каталогу SNM: (а) – за часом спостережень (місцевий); (б) – зенітна відстань радіантів. Елонгація від Сонця $\varepsilon > 90^\circ$ – відповідає антисонячній області, де фіксуються метеори до проходження перигелію, $\varepsilon < 90^\circ$ – відповідають навколосонячній області, де фіксуються метеори після проходження перигелію.

Цю обставину треба було очікувати з міркувань географічного розташування пунктів з метеорними патрулями, що, відповідно, приводить до зниження

числа фіксації метеорів в навколосонячній області. Тому, зазначена особливість не пов'язана з фізичною природою близькосонячних метеорних частинок, а виявлена геометрична селекція повинна прийматися до уваги при плануванні спостережень. До того ж, вона буде врахована при вивченні зміни мас частинок внаслідок їхнього випаровування поблизу Сонця (див. параграф 4.4).

Невід'ємною частиною пошуку генетичного зв'язку батьківського тіла із частинками в метеорних потоках є обчислення теоретичних координат радіантів. Для розрахунку теоретичних радіантів застосовувалася методика (відповідне програмне забезпечення у вільному доступі), описана в роботах [167]. У даній методиці для оцінки вірогідності обчисленого радіанта використовується D-критерій Саутворта-Хокинса [197]. Автори вказують, що найбільш упевнені обчислені радіанти мають параметр $D < 0,5$. На рис. 4.8 представлені теоретично розраховані радіанти в геоцентричній екліптичній системі координат для вибірково взятих близькосонячних комет. Розділимо отримані радіанти на три умовні групи: (a): $0 < D < 0,2$; (b): $0,2 < D < 0,5$; (c): $D > 0,5$. Як бачимо, усі найбільш достовірні радіанти розташовані до півночі і півдня уздовж екліптики в смузі шириною приблизно 30° .

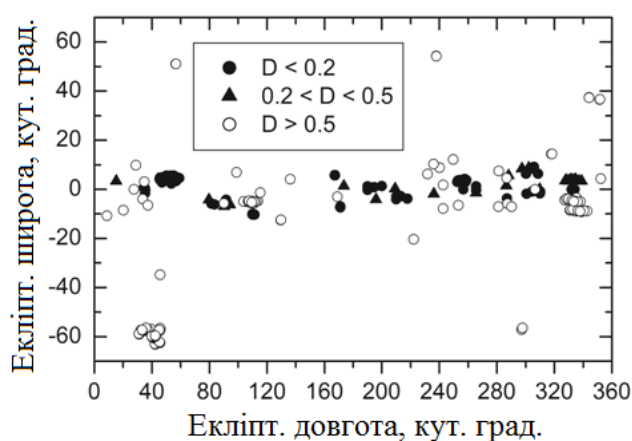


Рис. 4.8. Теоретичні радіанти відібраних випадковим способом близькосонячних комет. Зазначено три класи вірогідності обчисленого радіанта для відповідної комети (a) – $D < 0,2$; (b) – $0,2 < D < 0,5$; (c) – $D > 0,5$.

Зробимо порівняння реальних спостережень метеорів з теорією. На рис. 4.9 представлено розподіл радіантів спорадичних метеорів по геоцентричних екліптичних широтах. Вище було з'ясовано, що зазначені метеори групуються по елонгаціям радіантів від Сонця. Тому на рис. 4.9 наведені радіанти близькосонячних метеорів в інтервалах елонгацій $0^\circ < \varepsilon < 90^\circ$ та $90^\circ < \varepsilon < 180^\circ$. Без особливих зусиль відзначається дві гілки радіантів, які концентруються на екліптичних широтах порядку $7^\circ - 10^\circ$ до півночі й півдня відносно екліптики. Поділ на дві гілки в положенні радіантів спорадичних метеорів відносно екліптики підтверджується радіолокаційними спостереженнями, наприклад [141].

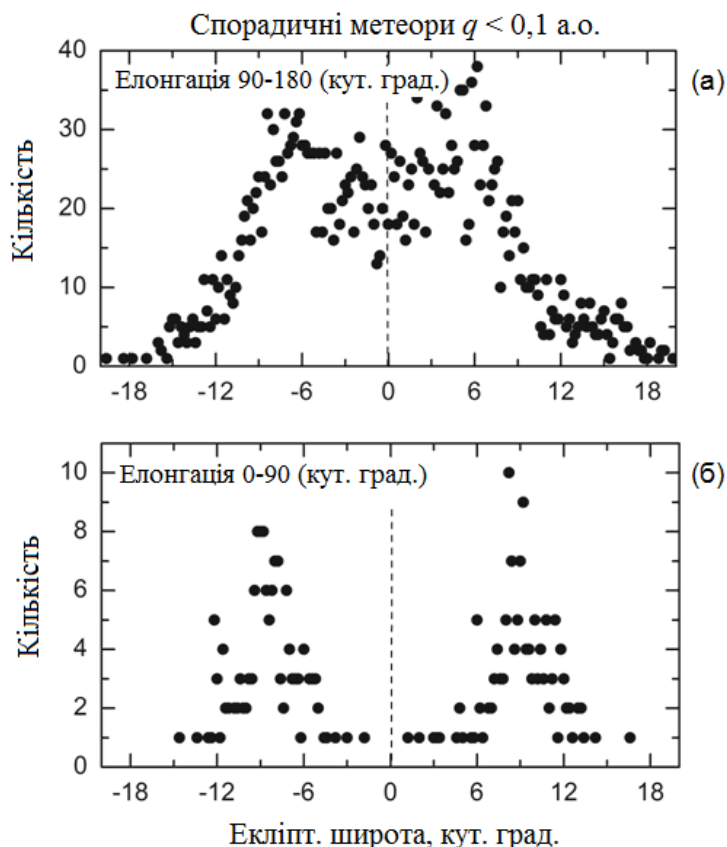


Рис. 4.9. Розподіл по геоцентричних екліптичних широтах положень радіантів спорадичних метеорів залежно від елонгації відносно положення Сонця на небесній сфері.

4.4. Прояв ефекту термічного впливу Сонця в розподілі метеорних частинок по масах.

Розглянемо питання про зміну мас пилових частинок у процесі випаровування їхньої речовини поблизу Сонця. Чи можливо виявити даний ефект за спостереженнями метеорів? Виходячи із припущення, що метеороїди можуть втратити деяку кількість речовини в результаті випаровування поблизу Сонця, розділимо метеорні частинки на дві групи: зафіксовані на своїх геліоцентричних орбітах “до” проходження перигелію та “після”. Далі, зробимо порівняння мас частинок цих груп.

На жаль, автори каталогу SNM не визначали маси метеорних тіл за вихідними спостереженнями їхніх кривих блиску (фотометричні маси⁽¹⁵⁾), але приводять їх фотометричні, позиційні й кінематичні параметри, які дають можливість оцінити маси частинок по емпіричній формулі, запропонованої в роботі [42]. Автори одержали формулу на підставі аналізу фотометричних мас яскравих метеорів, і вважають, що дана формула дозволяє з достатньою точністю визначити початкові значення мас метеорних тіл (m_0):

$$m_0 = \frac{1.62 \cdot 10^{25} \cdot 2.512^{-M_0}}{V_0^4 \cos Z_R}, \quad (4.1)$$

де m_0 – маса метеорної частинки, виражена в грамах, M_0 – абсолютна зоряна величина метеора в максимумі блиску, V_0 – швидкість метеорної частинки до входу в земну атмосферу ($\text{см} \cdot \text{сек}^{-1}$), Z_R – зенітна відстань в положенні радіанта.

Так, порівняння мас частинок для 170 яскравих метеорів, обчислених по формулі (4.1), що спостерігалися в Києві, показало, що 80% не більше ніж у два рази відрізняються від фотометричних мас і практично всі маси лежать у межах 0,33 – 3,0 г [42]. Автори, також вказують, що маси (m_0) близькі до фотометричних мас, а величина дисперсії не перевищує тих розходжень, які

¹⁵ Фотометрична формула для розрахунку позаатмосферної маси метеорного тіла виводиться з припущення, що у світність метеора переходить деяка частина кінетичної енергії. Більш докладно про визначення мас метеорних тіл описано, наприклад, у монографіях [34, 49, 61].

існують між різними моделями та шкалами метеорних мас. Значення фотометричних мас метеорних тіл представляють деяку нижню межу.

На рис. 4.10 показана залежність мас метеорних тіл обчислених по формулі (4.1) від абсолютної зоряної величини метеорів (M_0). Для порівняння представлені вибірки з каталогу MSSWG⁽¹⁶⁾ (Meteor Science Seminar Working Group) і каталогу опублікованого в [210]. Заповненими знаками позначені маси метеорних частинок, які визначені фотометричним способом, а порожніми ті, які розраховані по формулі (4.1).

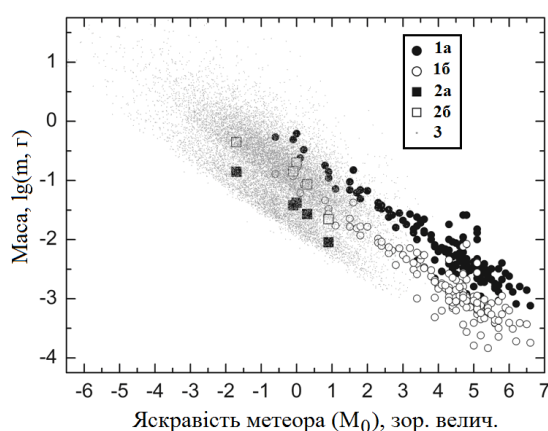


Рис. 4.10. Залежність маса $\lg(m, \text{г})$ – абсолютна зоряна величина метеора (M_0). Позначення: (1) – каталог MSSWG, (2) – каталог [210], (3) – каталог SNM (SanatoCo); (a) – фотометричні маси, (б) і (3) – маси розраховувалися по формулі (4.1).

Як бачимо, незважаючи на відмінність у загальній залежності для фотометричних мас у зазначених каталогах (імовірно, це пов'язане з різною спектральною чутливістю приймачів і характеристиками оптики метеорних патрулів, тобто різними фотометричними стандартами) усереднена залежність при використанні емпіричної формули (4.1) для обох каталогів добре узгоджується між собою. Дрібними точками на графіку представлені маси, розраховані по формулі (4.1) залежно від яскравості спорадичних метеорних тіл ($q < 0,3$ а.о.) для каталогу SNM.

¹⁶ <http://www.imo.net/files/msswg/msswg.txt>

На рис. 4.11 наведені розподіли по масах близькосонячних метеорних тіл каталогу SNM. Звертає на себе увагу, що максимуми двох груп зміщені відносно один одного ($\Delta m \sim 0,1$ г) і, до того ж, убік менших значень мас для післяперигелійних метеорних тіл.

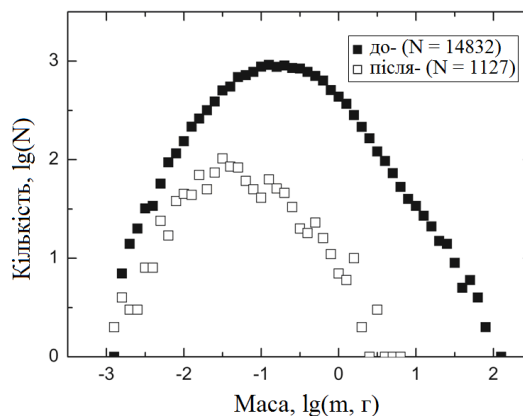


Рис. 4.11. Порівняння мас метеорних частинок зафіксованих на **до-** (заповнені точки) і **після-** (порожні точки) перигелійній частині геліоцентричної орбіти. N – загальна кількість тіл у розподілі.

Але перш ніж оцінити реальну величину зсуву необхідно відзначити, що загальна кількість метеорних тіл зафіксованих після проходження перигелію менше, приблизно, в 13 разів. Як було вже встановлене вище (див. параграф 4.3) це пояснюється впливом геометричної селекції. Розподіли були побудовані з використанням формули (4.1), тому розглянемо вхідні в неї величини і проаналізуємо їх на предмет селективного внеску в отриманий результат. На рис. 4.12 представлені розподіли геоцентричних швидкостей, абсолютних зоряних величин метеорів і зенітних відстаней їхніх радіантів. Незважаючи на розходження в кількості метеороїдів двох груп, загальний вид розподілів по швидкостях і яскравостях метеорів приблизно однаковий. Але істотно відрізняються розподіли по зенітних відстанях радіантів метеорів. Щоб звести до мінімуму вплив даної селекції в розподілі по масах, відберемо тільки ті метеори, які спостерігалися в однакових геометричних умовах, тобто коли радіанти метеорів займали найвище положення по висоті на небесній сфері щодо горизонту. В інтервалі зенітних відстаней $0^{\circ} \leq Z \leq 20^{\circ}$

(рис. 4.12в) розподіли по кількості зафіксованих метеорів у сонячній і антисонячній області приблизно схожі.

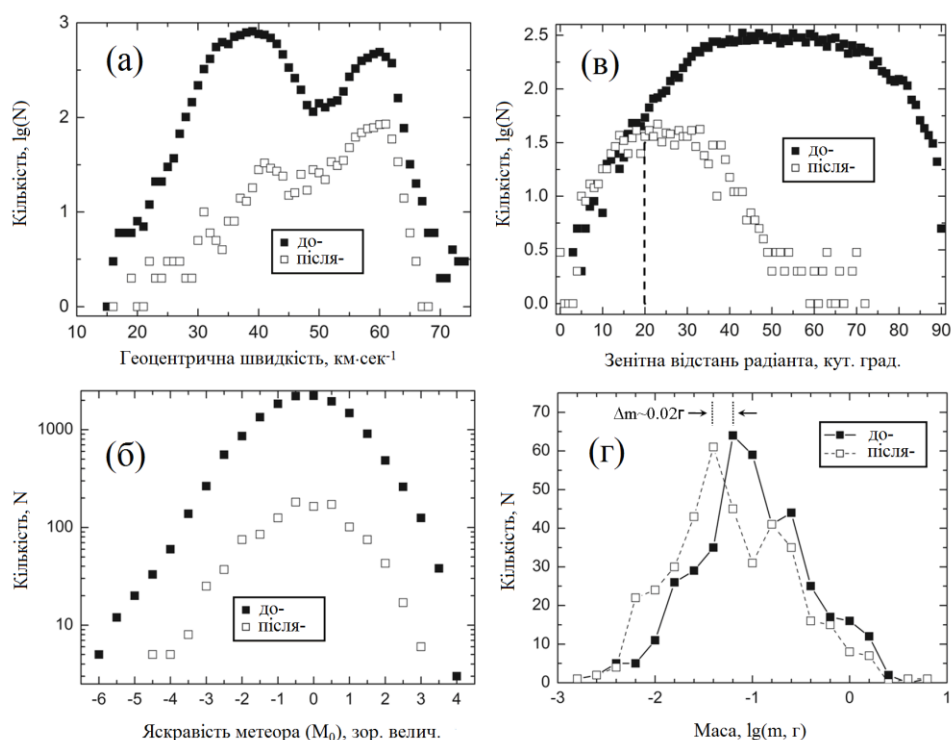


Рис. 4.12. Розподіл спорадичних метеорних тіл ($q < 0,3$ а.о.) каталогу SNM окремо для метеорних частинок, зафіксованих на до- (заповнені точки) і після- (порожні точки) перигелійній частини геліоцентричної орбіти. (а) – геоцентричні швидкості метеорів; (б) – абсолютна яскравість метеорів; (в) – зенітна відстань радіантів; (г) – розподіл по масах для метеорів із зенітними відстанями радіантів $0^0 \leq Z \leq 20^0$.

Таким чином, порівнюємо маси метеороїдів двох груп на зазначеному діапазоні зенітних відстаней у положенні їхніх радіантів (рис. 4.12г). Видно, що у розподілі мас двох груп на гістограмі спостерігається систематичний відносний зсув порядку 0,02 - 0,04 г убік менших значень для післяперигелійних метеорних частинок. Безумовно, зазначене значення у втраті речовини є оціночною і середньою по розглянутій вибірці метеорних тіл, тому що темпи втрати маси для окремих пилових частинок будуть залежати від хімічного складу, відстаней від Сонця, розмірів, рихлості, альбедних властивостей частинок, і ін. Далі (параграф 4.5), буде розглянуто механізм термічної десорбції речовини метеороїдів. У тому числі, буде

показано, що зазначена оцінка у втраті маси метеорних тіл погоджується з результатами модельних розрахунків.

4.5. Механізм термічної десорбції речовини метеороїдів.

4.5.1. Залежність температури пилових частинок від геліоцентричної відстані.

Температуру метеороїда на певній геліоцентричній відстані і швидкість його випаровування можна обчислити, якщо визначити термодинамічні властивості частинки, що звичайно складно здійснити дистанційними методами. Але для виявлення загальних закономірностей, з метою пояснення причин зменшення в кількості зафіксованих метеорних тіл на геліоцентричній відстані менше 0,1 а.о. (на рис. 4.3), а також, фізичного механізму термічного випаровування речовини метеороїдів та ін., скористаємося іншим способом.

Так, значення температури можна визначити за фотометричними спостереженнями пилової складової комет [77, 78]. У монографії [77, див. табл. 5.1] приводяться значення температури пилу в атмосфері комети Ікеуа-Секі 1965f. У зазначеній роботі визначався клас речовини пилових частинок (тобто металеві і напівпровідники) по вимірах їхніх температур зі зміною геліоцентричної відстані комети. Для обчислення температури були взяті значення потоків випромінювання в областях 2,2 і 3,4 мкм за вихідним даними опублікованих в [87]. Була знайдена зміна температури пилу як функція геліоцентричної відстані комети (у діапазоні 0,195 - 0,380 а.о.) у вигляді виразу:

виразі виразу: $\frac{d \lg r}{d \lg T} \approx -2,62$. При цьому температура частинок

обчислювалася по формулі $T \approx 1000 / \left(1,325 - \lg \frac{I_{(2,2)}}{I_{(3,4)}} \right)$. У підсумку був зроблений

висновок, що речовина пилових частинок комети являє собою напівпровідник з енергією активації домішок характерних для забруднених силікатів. Аналогічні обчислення температур пилу зроблені за результатами

спостережень в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль для шести комет (Bennett 1969I, Kohoutek 1973f, Bradfield 1974b, Kobayashi-Berger-Milon, West 1975n, Bradfield 1980f), у тому числі для комети P/Halley, і опубліковані в роботі [109]. Автори одержали, що зміну температури кометного пилу (альbedo 0,3) для геліоцентричних відстаней у діапазоні 0,1 - 1,5 а.о. можна представити у вигляді функції: $T = 310r^{-0.58}$. В опублікованій роботі [203] приводяться дані про колірну температуру пилу комети P/Halley (альbedo 0,05) як функції геліоцентричної відстані. Автори зробили висновок, що дана залежність визначається виразом $T = 315,5r^{-0.502}$, що на 15 % вище, ніж у випадку рівноваги із сонячним випромінюванням абсолютно чорного тіла. Температури комет IRAS-Araki-Alcock (1983d), Kohoutek, C/2012S1 (ISON), 103P/Hartley2, опубліковані в [97], [168], [170] і [180]. В 2007 році відбувся раптовий спалах (приблизно з +18^m до +2^m) комети 17P/ Holmes з викидом великої кількості пилу (порядку $4 \cdot 10^{10}$ кг). Імовірно, це було викликано зіткненням з іншим малим тілом Сонячної системи. Були проведені вимірювання температури пилу, що склала ~ 200 К [131]. Через три роки, коли комета перебувала на відстані 5,13 а.о. були проведені повторні вимірювання температури, що склала $\sim 134 \pm 11$ К [200]. Унікальним є експеримент по вивченню комети 67P/Churyumov-Gerasimenko за допомогою КА "Rosetta". Так, приладом VIRTIS була визначена температура ядра і пилової атмосфери навколо ядра, що на геліоцентричній відстані 3,69 а.о. склала 170 К [204].

В [111] приводяться значення температури пилових частинок Зодіакального світла на різних геліоцентричних відстанях по вимірах за допомогою КА IRAS (Infrared Astronomical Satellite) і ракети ZIP (Zodiacal Infrared Project). Отримано залежність зміни температури пилу: $T \sim r^{-0,33 \pm 0,08}$ і $T \sim r^{-0,32 \pm 0,1}$ для IRAS і ZIP відповідно. Пізніше, у роботі [198] були переглянуті результати спостережень за допомогою апаратів IRAS і ZIP. Зроблено висновок, що температура пилових частинок діаметром 10^{-4} - 10^{-6} м

у зодіакальній хмарі варіюється від 130 - 190 К до 380 - 390 К. За допомогою приладу встановленого на повітряній кулі і піднятій на висоту 32 км були проведені спостереження Зодіакального світла на довжині хвилі 2,4 мкм [129]. У результаті отримана температура пилових частинок зодіакальної хмари на відстані 1 а.о. від Сонця, що склала 340 К. В іншому випадку були здійснені вимірювання за допомогою багатоканального фотометра інфрачервоного діапазону для спостереження дифузійного інфрачервоного фону (DIRBE) установленого на космічному апараті COBE (Cosmic Background Explorer). У результаті чого, була запропонована модель розподілу температури пилу зодіакальної хмари, яку можна виразити у вигляді функції: $T = 286r^{-0.467}$ [140, 108].

На рис. 4.13 представлені дані по визначенню температури кометної речовини і пилу в зодіакальній міжпланетній хмарі на різних геліоцентричних відстанях.

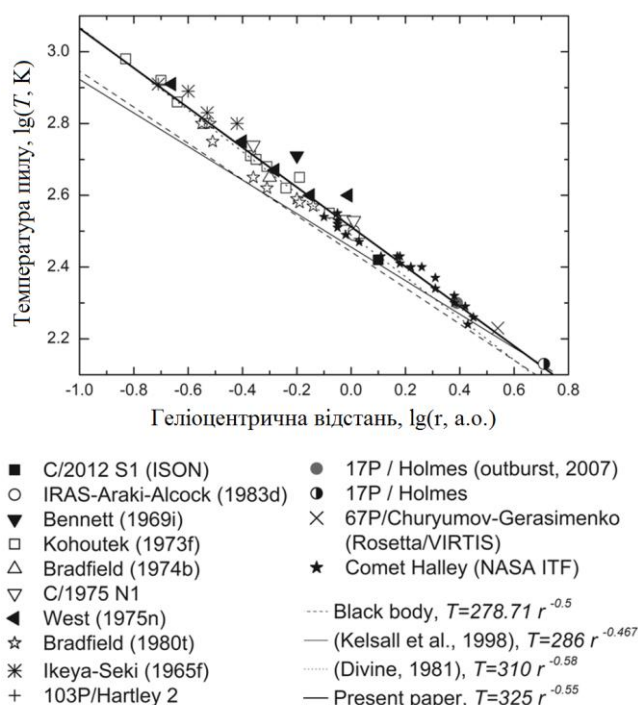


Рис. 4.13. Температура пилових частинок різних комет і міжпланетної зодіакальної хмари як функція геліоцентричної відстані.

Узагальнюючи спостережні дані, температуру (T) пилових частинок як функцію геліоцентричної відстані (r) за спостереженнями комет можна виразити у вигляді функції:

$$T = 325 r^{-0.55} \quad (4.2)$$

Добре помітна відмінність даної функціональної залежності від аналогічної залежності для температури пилу в наближенні випромінювання чорного тіла або для пилових частинок Зодіакального світла.

4.5.2. Хімічний склад речовини кометних пилових частинок. Температура і тиск пару при випаровуванні метеороїдної речовини.

Склад речовини кометних пилових частинок на цей час достатньо добре відомий. Так, наприклад, в [183] приводяться відомості про склад речовини частинок, що належать кометі Wild 2, і які захоплені вловлювачем в експерименті *Stardust*. Відзначається високий вміст SiO_2 , SiO_3 , MgO . Зібрані частинки є хімічно неоднорідними з розмірами порядку 5 - 25 мкм. Ці частинки являють собою суміш компактних зерен (65%) і пухких, менш агрегованих структур (35%).

Досить цікавими є останні результати по вивченню пилових частинок комети 67P/Churyumov-Gerasimenko в експерименті COSIMA (Cometary Secondary Ion Mass Analyser) і опублікованих, наприклад, в [154, 89, 164]. Прилад являє собою вловлювач пилових частинок з можливістю їхнього дослідження в режимі in-situ. COSIMA є мас-спектрометром вторинних іонів, що складається з гармати, що вистрілює первинні іони, пиловловлювачів, оптичного мікроскопа для відображення самого зерна і його положення на мішені, а також спеціального маніпулятора, що забезпечує переміщення мішені між різними інструментами. Не вдаючись у подробиці роботи самого приладу, тільки звернемо увагу, що він дозволяє оцінити хімічний склад поверхні пилового зерна. Вже перші результати аналізу показали, що серед інших компонентів частинок пилу (вуглецеві сполуки, алюміній, кремній,

кальцій, залізо) є магній і натрій [184, 113]. Виявлення натрію в пилу, причому в мінеральній фазі, було особливо несподіваним, тому що натрій і магній ніколи раніше не виявлявся під час наземних спостережень комети 67P/Churyumov-Gerasimenko, на відміну від багатьох інших комет. Але, з іншого боку, великий вміст натрію в складі кометної речовини передбачався раніше в роботах [205, 206]. Вони вказували на досить важливий факт, пов'язаний зі спостереженнями спектрів яскравих метеорів. Стверджується, що хімічний склад метеорних тіл, визначений по спектрах, аналогічний сполучі хондритів, але вміст натрію, при цьому, був надлишково високим. Цей надлишок супроводжувався деякими цікавими доповненнями:

1. Спектральні лінії, пов'язані з мультиплетом Na1-1 звичайно з'являються раніше ліній інших хімічних елементів. Імовірно, це може бути пов'язане з якоюсь летучою фазою, що легко відділяється з метеорних тіл у найперші моменти абляції. Автори припускають, що органічні речовини які легко видділяються або силікати, що містять натрій, можуть бути присутнім у складі кометного пилу.

2. Інтенсивність ліній натрію зростає в яскравих спалахах метеорів, пов'язаних із процесом фрагментації метеорного тіла. Якщо структура кометних пилових частинок аналогічна моделі, що запропонована в [127], то в такому випадку Na може бути присутнім у якості мінеральної фази, що “склеює” зерна частинки і, як наслідок, вона буде легко видділена під час процесу фрагментації.

Необхідно додати, що багато великих частинок зібраних COSIMA легко розвалюються на більш дрібні фрагменти. Це говорить про те, що вони були слабо зв'язані між собою. Також, вони не містили фрагментів льоду. Даний факт, а так само те, що натрій у хімічному складі частинок є “сполучною”, буде важливий для подальшого моделювання механізму випаровування метеороїдів в навколосонячному просторі.

Таким чином, склад кометних пилових частинок аналогічний складу вуглецевих метеоритів, і не суперечить складу речовини метеорних тіл, що вивчались спектральними методами. Але які фізико-кінетичні зміни в речовині перетерплять пилові частинки на близьких відстанях від Сонця під впливом високих температур? Для цього звернемося до експериментів по випаровуванню метеоритної речовини.

В [79] опубліковано результати вивчення явищ випаровування метеоритної речовини ефузійним методом Кнудсена. Розглянемо докладно важливі для наших цілей висновки цих досліджень. Авторами були проведені експерименти з хондритами Murchison (CM), Кримка (LL3), піроксеновими хондритами метеорита Саратов (L4), а також із Ca-Al-включеннями хондрита Єфремовка (CV). Визначалися температура і парціальні тиски компонентів системи розплав-пар у широкому діапазоні температур (від ~ 1170 до ~ 2870 К), а парціальні тиски компонентів вимірялися на рівні 10^{-7} мм рт.ст. (верхня межа тиску становила $10^{-1} - 10^{-2}$ мм.рт.ст.). У парах спостерігалися моноатомні форми K, Na, Fe, Mg, Ca, Al, субокісні та окісні форми SiO, TiO₂, TiO, Al₂O, AlO, Al₂O₂. Оскільки дані форми утворилися при розкладанні оксидів, то в парі постійно і у відповідних кількостях був присутній кисень у формах O і O₂. Дослід показав, що на самих початкових етапах випаровування в парі переважають лужні компоненти. Розрахунки сполуки комплементарної пари показали, що при відносно низькій температурі випаровування (до 1570 К) вміст калію в парі при перерахуванні його на окісну форму (K₂O) досягає значень 5 – 10 мас. %, а Na₂O до ~ 70 мас. %. У температурному інтервалі від 1670 до 1970 К у парах домінує залізо, вміст якого при перерахуванні на FeO досягає ~ 40 мас. %.

У представлених даних варто звернути увагу на наступні обставини. При температурі 2070 К і вище в парах практично повністю зникає кремнезем. Відповідно, ріст вмісту SiO₂ у парі відбувається до температури ~ 2070 К, а потім вміст різко падає через збільшення в парі вмістів Al₂O₃ і

CaO. Вміст Al_2O_3 при температурі ~ 2270 К досягає 60 – 65 мас. %. Істотні відмінності від характеристик випаровування хондритів спостерігалися при випаровуванні основних типів (А і В) Ca-Al-включень хондрита Єфремовка. У високотемпературній області (2270 – 2670 К) у парах поряд зі звичайними формами від важколетючих оксидів кальцію, титану й алюмінію постійно була присутня форма SiO. Причому тиск даної форми був досить високим ($\sim 10^{-6}$ бар) і приблизно рівним тиску форм Ca і Al.

Зазначені температури інтенсивного випаровування метеоритної речовини, відповідно до функціональної залежності (4.2), відповідають геліоцентричним відстаням менше 0,1 а.о. (рис. 4.14).

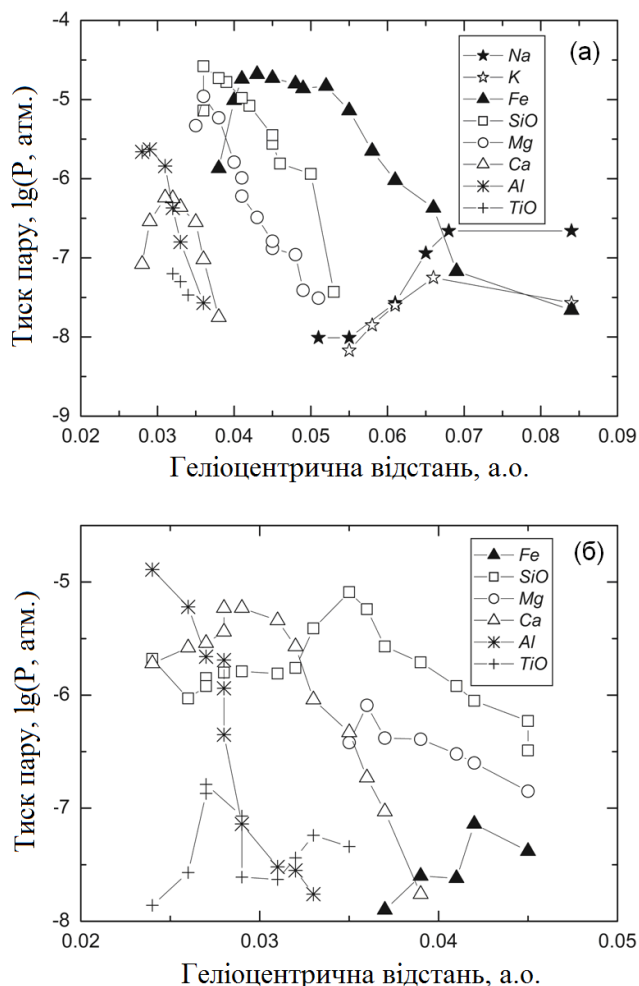


Рис. 4.14. Модельне уявлення: тиск пару $\lg(P, \text{атм.})$ речовини метеороїдів як функція геліоцентричної відстані (а.е.). Геліоцентрична відстань розраховувалася по формулі (2.2), а значення температур і тисків пару бралися з експериментальних даних по випаровуванню метеоритних зразків в [79]. Модель: (а) – “хондрит Murchison”; (б) – “хондрит Єфремовка”.

Так, інтенсивне випаровування лужних компонентів Na і K відповідало б геліоцентричним відстаням 0,04 – 0,08 а.о., випаровування Fe відбувається на відстанях від Сонця порядку 0,05 – 0,07 а.о., кремнезем SiO_2 повністю випаровується на геліоцентричних відстанях $\sim 0,04$ а.о., а на відстані $\sim 0,03$ а.о. відбувається інтенсивне випаровування Al_2O_3 .

Підтвердженням останніх висновків є робота [130], у якій розраховувалася швидкість випаровування кометних пилових частинок залежно від їхнього хімічного складу, розмірів і геліоцентричної відстані. Автор розглядав різні хімічні речовини частинок, які спостерігалися в спектрі комети Ікея-Секі 1965f під час її руху на геліоцентричних відстанях менше 0,7 а.о. Спостережуване зникнення пилового хвоста комети на геліоцентричній відстані від 4 до 8 R_\odot можна було пояснити обмеженим часом життя малих частинок під час їх випаровування. На малих геліоцентричних відстанях тільки частинки з великою теплою паротворення зможуть вижити, щоб потрапити в далекі межі кометного хвоста. Зіставляючи результати теоретичних розрахунків зі спостереженнями, автором був зроблений висновок, що швидкість випаровування Na з поверхні частинки на геліоцентричній відстані 0,04 а.о. ($8,6 R_\odot$) становить $2 \cdot 10^{-2}$ см·сек⁻¹. Тому, наприклад, пилова частинка розміром $2 \cdot 10^{-5}$ см випарується за 10^{-2} сек. Елементи Fe, Ni, Co, Cr і Cu інтенсивно випаровуються на геліоцентричних відстанях менше 0,06 а.о. Всі їх сильні лінії знаходяться у видимій області спектра і, більшість з них були виявлені в спектрі комети на цих відстанях.

Таким чином, результати експериментів по випаровуванню метеоритної речовини при нагріванні і спектральні спостереження комет пояснюють різке зменшення кількості метеорних тіл з перигелійними відстаннями в орбітах менше 0,1 а.о., а також, недостачу або повну відсутність деяких хімічних речовин у складі частинок при проведенні спектральних спостережень метеорів.

4.5.3. Модель випаровування пилових частинок поблизу Сонця.

Теоретичним дослідженням випаровування (сублімації) пилових кометних частинок у міжпланетному просторі присвячено багато робіт. Загальне уявлення про дану тему можна одержати на прикладі публікацій: [44, 61, 130, 77, 159, 160] та ін. Використовувані авторами методи розрахунків засновані на залежності швидкості сублімації речовини частинок від їхніх термодинамічних характеристик і властивостей розсіювання світла тілами, які в підсумку визначають температуру пилу на заданій відстані від Сонця. У дисертаційній роботі застосовується аналогічний метод, заснований на кінетичній теорії випаровування пилових частинок.

Процес випаровування описується рівнянням Клапейрона-Клаузіуса, що зв'язує в диференціальній формі тиску пари (p), температуру (T) і величину молярної схованої теплоти випаровування або сублімації (H):

$$\frac{dp}{dT} = -\frac{H}{RT^2} p,$$

де R – газова постійна (8,314 Дж·К⁻¹·моль⁻¹).

Для малих значень пружності пари величина H може бути прийнятою постійною, тоді результат інтегрування може бути записаний у вигляді:

$$\lg p = A - \frac{B}{T}, \quad (4.3)$$

де p – пружність пари, T – температура, A і B – константи при фазовому переході речовини в процесі зміни температури (у певному інтервалі температур).

Для конкретної речовини константи A і B , що входять у формулу (4.3), шукаються експериментальним способом. Значення цих констант, так само як і інші теплофізичні характеристики, опубліковані у вигляді довідкових монографій, наприклад [48, 45, 53] і ін. Слід зазначити: часто літературні джерела містять для тої самої речовини різні значення термодинамічних параметрів, що пов'язано з різними умовами проведення лабораторних

вимірювань. У нашому випадку необхідною і важливою умовою є величина тиску, при якому відбувається випаровування.

Нижче ми будемо записувати результат інтегрування рівняння Клапейрона-Клаузіуса у вигляді:

$$p = p_0 e^{-\frac{U}{kT}}, \quad (4.4a)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ ерг/град – постійна Больцмана, U – теплота випаровування, яка припадає на один атом. Тоді U та p_0 можуть бути визначені, відповідно, по куту нахилу і точці перетину з віссю ординат графіка залежності $\ln p$ від $1/T$:

$$\ln p = \ln p_0 - \frac{U}{kT}, \quad (4.4b)$$

Потік випаровування речовини у вакуум описується законом Герца-Кнудсена:

$$j = \frac{1}{4} n \bar{u} = \frac{p(T)}{\sqrt{2\pi m_a kT}}, \quad (4.5)$$

де j – потік атомів, що випарувалися, n та p – концентрація й тиск насиченої пари при температурі T , m_a – маса атома $\bar{u} = (8kT / \pi m_a)^{1/2}$, – середня теплова швидкість частинок які випаровуються.

У випадку метеорних тіл швидкість випаровування V_T , відповідно до закону Герца-Кнудсена:

$$V_T = \frac{p_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)}{\sqrt{2\pi M m_p kT}} N_{at} \omega, \quad (4.6)$$

де V_T виражається в $\text{см} \cdot \text{сек}^{-1}$, $T(\text{K})$ – температура частинки; N_{at} – число атомів в кластері що відривається; M – його молекулярна (атомна) маса; m_p – маса протона; ω – об'єм, що припадає на один атом.

Формула (4.6) застосовна доти, поки потоку випромінювання від Сонця досить, щоб забезпечити підведення тепла для випаровування. Для більших

швидкостей випаровування цього потоку випромінювання не вистачає, і швидкість випаровування V_S буде визначатися вже не температурою, а потоком тепла, що падає на поверхню частинки, на даній геліоцентричній відстані r :

$$V_S = \frac{S_0}{r^2} \frac{N_{at} \omega}{U}, \quad (4.7)$$

де $S_0 = 1,37 \cdot 10^6$ ерг·см⁻²·сек⁻¹ сонячна стала, r виражено в а.о.

Формула (4.6) застосовна при низьких температурах, коли випаровування повільне і $V_T < V_S$, а формула (4.7) при більш високих. Таким чином, для подальших розрахунків необхідно вибрати ту швидкість, що має менше значення. Як приклад на рис. 4.15 і 4.16 представлені значення швидкостей випаровування (V_e) як функція зміни температури і геліоцентричної відстані для пилових частинок, що складаються з різних речовин – Fe і SiO₂. Для Fe приймалися наступні значення: $N_{at} = 1$, $M = 56$. У випадку випаровування кремнезему SiO₂ приймемо $M = 30$, а для N_{at} зручно використовувати значення 2,5, щоб об'єм ω , що припадає на один атом, брати тим самим $\omega = 10^{-23}$ см³. Теплота випаровування, що припадає на один атом для заліза: $U(Fe) = 4,02$ еВ. Для SiO₂ розглянемо два варіанти значень, які виходять із даних, що зустрічаються в літературі: $U_1 = 3,35$ еВ і $U_2 = 3,7$ еВ. У формулах (4.5) – (4.7) теплоту випаровування необхідно виразити в ерг (1 еВ = $1,6 \cdot 10^{-12}$ ерг). Значення змінної, що стоїть перед експонентою відповідно дорівнює: $p_0(Fe) = 10^{13}$ дин/см², $p_0(SiO_2)_1 = 3 \cdot 10^9$ дин/см², $p_0(SiO_2)_2 = 3 \cdot 10^{13}$ дин/см².

Теплоту випаровування, що приходить на один атом, для інших речовин можна розрахувати, використовуючи термодинамічні константи, які опубліковані в різних літературних джерелах, наприклад [52]⁽¹⁷⁾.

¹⁷ Або, наприклад, термодинамічні параметри, які зкомпільовано з різних літературних джерел, представлених в електронному вигляді на сайті <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl>

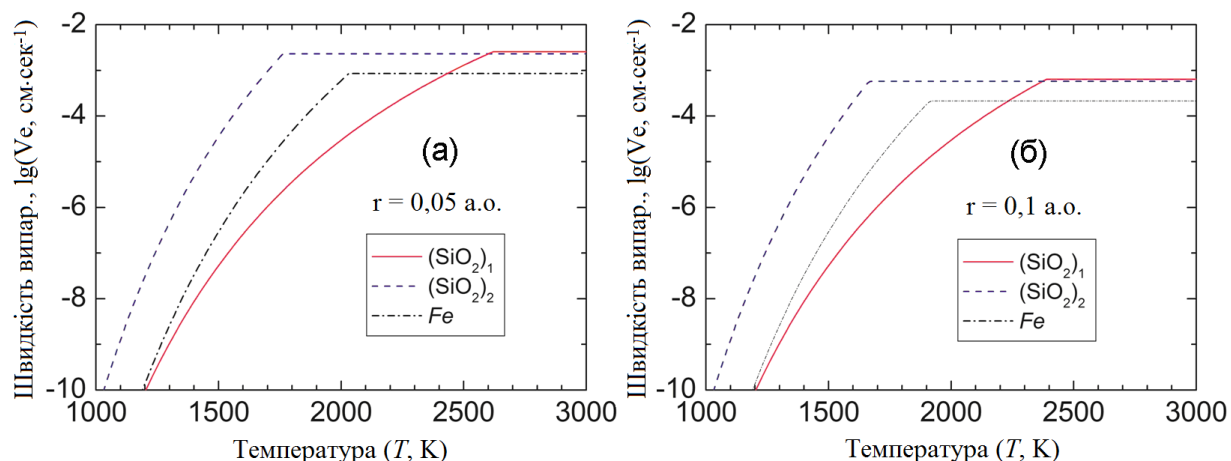


Рис. 4.15. Значення швидкостей випаровування (V_e) як функція зміни температури (T) і геліоцентричної відстані (r) для пилових частинок, що складаються з різних речовин – Fe і SiO_2 .

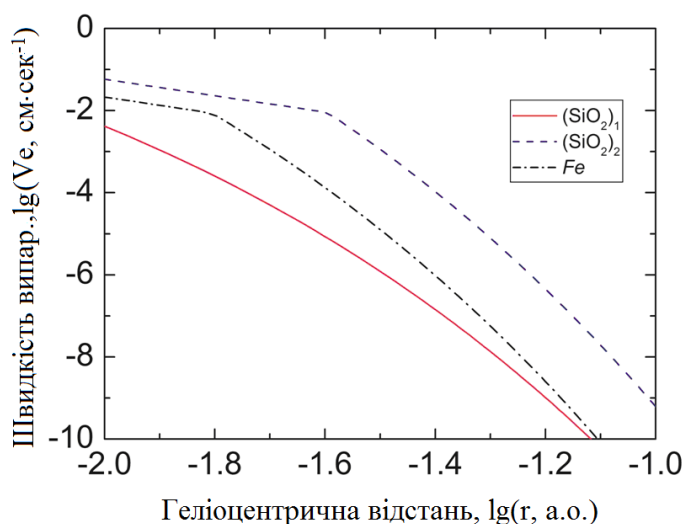


Рис. 4.16. Значення швидкостей випаровування (V_e) як функція зміни геліоцентричної відстані (r) для пилових частинок, що складаються з різних речовин – Fe і SiO_2 .

4.5.4. Результати й аналіз модельних розрахунків по випаровуванню пилових частинок поблизу Сонця.

Вихідними даними для моделювання процесу випаровування пилових частинок поблизу Сонця є значення елементів орбіт метеорних тіл і їх атмосферні кінематичні параметри, узяті з каталогу метеорних спостережень SNM. Маса метеорних тіл розраховувалися по формулі (4.1). Модельні

розрахунки ґрунтуються на описі процесу випаровування, викладеного вище (параграфи 4.5.2 і 4.5.3). У результаті моделювання необхідно з'ясувати:

1. частку речовини, що випарувалася з метеорних частинок під час їхнього руху по геліоцентричних орбітах (залежність від геліоцентричної відстані);

2. відсоток метеорних тіл які “виживають” (тобто повністю не випаровуються) залежно від мас частинок, хімічного складу, геліоцентричних відстаней.

У підсумку буде проведене порівняння результатів моделювання зі спостереженнями.

Процес моделювання проводиться в наступному порядку:

1. У каталозі відбираються спорадичні метеори з перигелійними відстанями в орбітах $q < 0,3$ а.о. Вибір цього значення ґрунтується на попередньому аналізі з висновком, що на більших геліоцентричних відстанях пилова частинка сублімує в мізерно малих кількостях (тобто можна знехтувати).

2. Для кожної частинки розраховуємо їхню масу відповідно до формули (4.1) і припускаємо її хімічний склад, розмір, пористість. Вважаємо частинку сферичною.

3. Починаючи з геліоцентричної відстані 1 а.о., на доперигелійній частині орбіти визначаємо положення частинки в навколосонячному просторі з певним кроком за часом. У нашому випадку крок за часом дорівнює 1 сек. На кожному кроці обчислюємо геліоцентричну відстань і відповідну температуру частинки по формулі (4.2). Далі робимо випаровування деякої кількості речовини по описаній вище методиці і розраховуємо нові значення маси частинки, її розмір, частку хімічної речовини, що залишилося.

4. Процес повторюємо для всіх пилових частинок доти, поки кожна з них не виявиться на геліоцентричній відстані 1 а.о., але вже після проходження перигелію. У тому випадку, якщо маса частинки на певному

кроці виявиться рівною нулю, тоді вважаємо що частинка повністю випарувалася. Всі частинки, які досягли геліоцентричної відстані 1 а.о. після проходження перигелію вважаються такими що вижили.

У результаті моделювання з'ясувалося, що з 13557 частинок, що складаються з Fe, випарувалися повністю 1009. Перші випадки повного випаровування частинок фіксувалися на геліоцентричних відстанях порядку 0,07 а.о. На рис. 4.19а представлений розподіл по геліоцентричних відстанях, на якому модельні частинки повністю сублимували під час зближення із Сонцем. Видно, що основна частина таких метеороїдів випарувалася в інтервалі геліоцентричних відстаней 0,04 - 0,06 а.о. (максимум 0,049 а.о.). У тому випадку, якщо у якості речовини розглядався кремнезем (SiO_2), тоді з вихідних 13557 частинок не вижили 729. Основна їхня частина випарувалася в інтервалі геліоцентричних відстаней 0,03 - 0,055 а.о. (з максимумом $\sim 0,042$ а.о.) (рис. 4.19б).

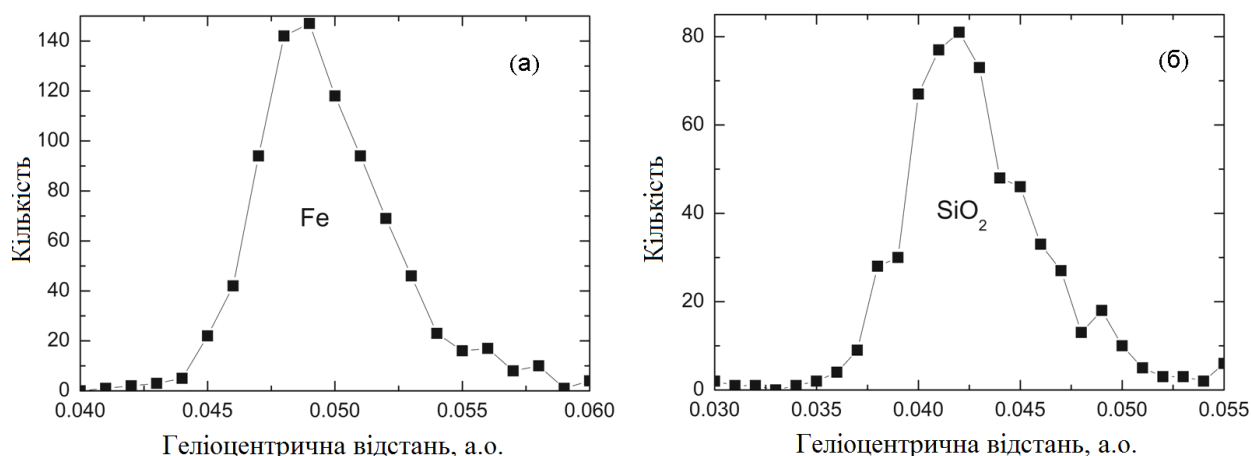


Рис. 4.19. Розподіл по геліоцентричних відстанях, на якому модельні частинки повністю випаровувалися під час зближення із Сонцем. Речовина частинок: (а) – Fe; (б) – SiO_2 .

Таким чином, маємо гарне узгодження з висновками, викладеними в параграфі 4.5.2, де розглядалося питання про залежність інтенсивного випаровування різних речовин від геліоцентричної відстані.

В обох розглянутих випадках, частинки що вижили мають орбіти з $q > 0,05$ а.о. Таких частинок, з масами більше $2,9 \cdot 10^{-3}$ г та які побували в

навколосонячній “критичній” зоні на геліоцентричних відстанях менше 0,1 а.о., складає порядку 70%. Знайдемо різниці між початковими і кінцевими значеннями їх мас після зближення з Сонцем. В такому випадку, ми зможемо оцінити: скільки речовини випарувалося в результаті теплового впливу Сонця на метеороїди. На рис. 4.20 представлено розподіл по масах речовини яка випарувалась у модельних залізних (Fe) частинок що вижили. Видно, що на фоні значень дефекту мас $\sim 0,1$ г існує чітко виражений пік 0,01 - 0,02 г. Це узгоджується з результатами метеорних спостережень, які дають значення в зміщенні розподілів по масам 0,02 - 0,04 г (див. Пункт 4.5, рис. 4.12г). Таким чином, ефект зміни мас пилових частинок в результаті термічної дії Сонця підтверджується модельними розрахунками.

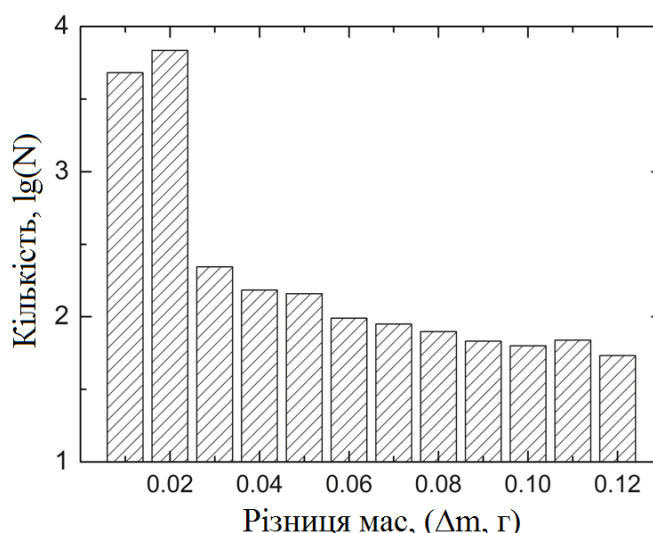


Рис. 4.20. Розподіл по масах (Δm) речовини, що випарувалося, модельних частинок (Fe) під час зближення із Сонцем. N – кількість частинок.

4.6. Залежність хімічного складу метеорних тіл від перигелійної відстані їхніх геліоцентричних орбіт. Прояв ефекту термодесорбції в спектрах метеорів.

Ефект теплового впливу на різні класи об'єктів Сонячної системи при наближенні їх на невеликі відстані до Сонця розглядався неодноразово. Так, наприклад, в [161] було підняте питання про тепловий вплив на склад поверхні, що зближаються із Землею астероїдів (NEOs), які піддалися

нагріванню в близькосонячній області. Термодесорбцію натрію з кометних частинок виявили по емісійних D-лініях натрію комети C/1995 O1 (Hale-Bopp) під час спектральних спостережень протягом чотирьох місяців (січень - травень 1997 р.) поблизу перигелію [115]. Автори відзначили варіацію натрію залежно від геліоцентричної відстані. Деякими авторами вказується на існування залежності вмісту хімічних елементів у пилових частинках як функція перигелійної відстані (для $q < 0,1$ а.о.) їхніх орбіт. Даний факт розглядають як результат термічного впливу на пилову частинку в близькосонячній області. Вміст натрію (Na) у частинках як функція перигелійної відстані (для $0,14 < q < 0,99$ а.о.) їхніх орбіт вивчався в роботі [139]. Було знайдено, що вміст Na у пилових частинках не залежить від перигелійної відстані. Але для частинок з $q < 0,1$ а.о. можлива десорбція металів, зокрема Na. Аналогічний результат був отриманий в [91]. Авторами проведений аналіз 97 спектрів в основному спорадичних метеорів у діапазоні яскравостей від $+3^m$ до 1^m , що відповідає розмірам метеороїдів 1-10 мм. Для більшості метеороїдів геліоцентричні орбіти були добре відомими. Автори класифікували спектри по відносній інтенсивності ліній Mg, Na, Fe. Зокрема, метеороїди, що мають орбіти з малими перигелійними відстанями ($q \leq 0,2$ а.о.), були позбавлені Na у результаті термодесорбції. Наприклад, метеори δ -Акварид ($q = 0,07$ а.о.) повністю позбавлені Na. Автори роблять висновок, що в складі спорадичних частинок з перигелійними відстанями $q \sim 0,03$ а.о. не тільки Na, але й Mg і Fe повинні бути відсутніми. Це твердження підтверджується експериментами і модельними розрахунками, проведеними в параграфах 4.5.2 - 4.5.4, де залізні частинки з аналогічними масами повністю випаровувалися на геліоцентричних відстанях порядку 0,04 а.о.

Але швидше за все, ситуація з аномалією в хімічному складі цих метеороїдів буде трохи складніша. Для виявлення ефекту термодесорбції в хімічному складі речовини метеорних тіл використовувалися опубліковані результати позиційних і спектральних спостережень метеорів. Так, в [210]

представлено каталог метеорних спектрів з низькою роздільною здатністю. Побудуємо залежність інтенсивності спектральних ліній відповідних хімічних елементів спостережених метеорів від перигелійної відстані геліоцентричних орбіт метеорних тіл. Така діаграма для ліній Mg1-2, Na1-1 і Fe1-15 представлена на рис. 4.21. Як бачимо, якої-небудь явної закономірності не спостерігається.

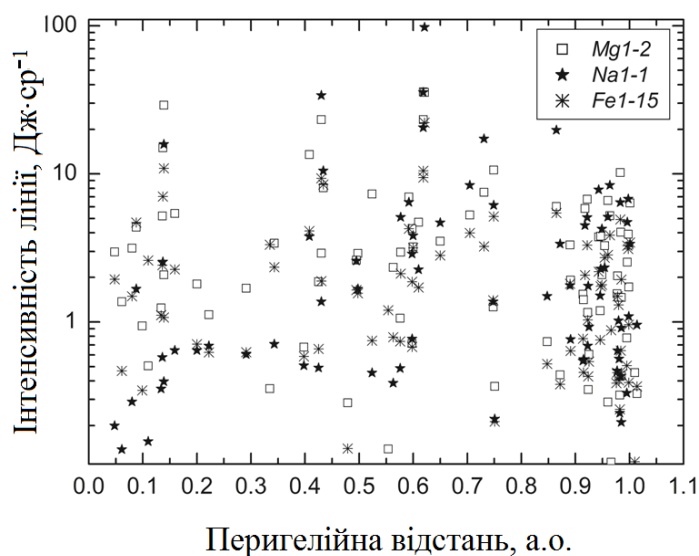


Рис. 4.21. Діаграма залежності інтенсивності спектральної лінії Mg1-2, Na1-1 і Fe1-15 у спектрах метеорів від перигелійної відстані орбіт метеорних тіл.

Але деякі висновки про прояв в спектрах метеорів ефекту термічної десорбції можна зробити, якщо використовувати не прямо інтенсивності спектральних ліній, а відношення інтенсивностей спектральних ліній летючих речовин (Na, K) до інтенсивностей ліній тугоплавких елементів (у нашому випадку Fe). Така діаграма для відношення інтенсивності ліній Na1-1 до Fe1-15 представлена на рис. 4.22. Звертає на себе увагу, що в метеорних тілах Na і Fe є присутнім у різних кількостях незалежно від мінімальної геліоцентричної відстані метеорного тіла на своїй орбіті, але відносний вміст Na зі зменшенням геліоцентричної відстані систематично знижується й зверху обмежений деякою функцією. На діаграмі верхня границя залежності

відношення $\left[\frac{Na}{Fe}\right]$ від значення перигелійної відстані (q) в орбіті метеорного тіла обмежена прямою:

$$\left[\frac{Na}{Fe}\right]_{\max} = 10,167q, \quad (4.11)$$

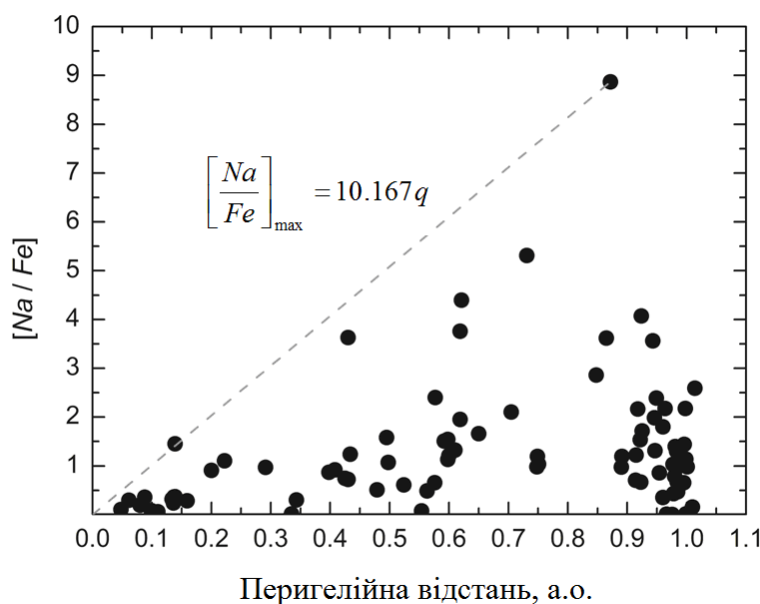


Рис. 4.22. Діаграма залежності відношення інтенсивностей спектральних ліній $Na1-1$ і $Fe1-15$ у спектрах метеорів від перигелійної відстані орбіт метеорних тіл.

В атомно-емісійному спектральному аналізі добре відома емпірична залежність між інтенсивністю спектральної лінії атома певного хімічного елемента і концентрацією речовини в пробі (формула Ломакіна-Шайбе):

$$I = aC^b, \quad (4.12)$$

де I – інтенсивність спектральної лінії; $a = Ae^{\frac{E}{kT}}$ – константа, що залежить від джерела збудження і властивостей речовини проби; C – масова частка (абсолютний вміст) елемента в пробі; b – коефіцієнт самопоглинання.

Інтенсивність спектральної лінії є більш складною функцією не тільки аналізованого елемента, але й вмісту інших елементів у пробі⁽¹⁸⁾:

$$I = f(C_1, C_2, \dots, C_n)$$

Таким чином, можна припустити, що відхилення від функції (4.11) залежить як від хімічного складу частинки, так і термічного впливу. Ймовірно, навіть для частинок, які мають відносно більші значення перигелійних відстаней орбіт, ефект термодесорбції буде накопичуватися згодом при періодичному русі по своїй орбіті. У цьому випадку значення $\left[\frac{Na}{Fe} \right]$ зменшується, а на діаграмі частинка буде "опускатися" вниз щодо функціональної залежності (4.11). У формулі (4.12) коефіцієнти можуть бути визначені експериментально тільки для зразків метеоритів, а для метеорних частинок це не представляється можливим.

На рис. 4.23 показана діаграма залежності відношення інтенсивностей спектральних ліній Na1-1 і Fe1-15 у спектрах метеорів від температури метеорних частинок, що отримана ними на мінімальних відстанях від Сонця, відповідно до функціональної залежності (4.2). З врахуванням (4.11) верхня границя залежності $\left[\frac{Na}{Fe} \right]_{\text{max}}$ від температури для вибірки, у такому випадку:

$$\left[\frac{Na}{Fe} \right]_{\text{max}} = 3.1 \cdot 10^5 T^{-1.79} \quad (4.13)$$

На рис. 4.23 видно прояв "складної" кореляції вмісту натрію залежно від температури що нагріла частинку на мінімальній відстані від Сонця. Треба відзначити, що в даній залежності використовуються спостережувані інтенсивності ліній різних хімічних елементів у складі метеорних тіл під час їхнього вторгнення в атмосферу Землі. У такому випадку, при рівних температурних умовах іонізації частинки ці речовини мають не однакову

¹⁸ При збільшенні концентрації інтенсивність лінії збільшується і може досягти певної межі і буде відповідати інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі джерела.

швидкість випаровування. Тому, відносна інтенсивність визначається ще й тим, наскільки ці елементи і їхні сполуки відрізняються тиском пару, міцністю сполук і інших характеристик та процесами. Чим ближче зазначені властивості елементів і чим ближче оптичні характеристики їхніх ліній, тим краще відносна інтенсивність передає співвідношення концентрацій. Це питання ще належить вивчити в майбутньому, що вимагає проведення як лабораторних експериментів, так і спектральних спостережень метеорів.

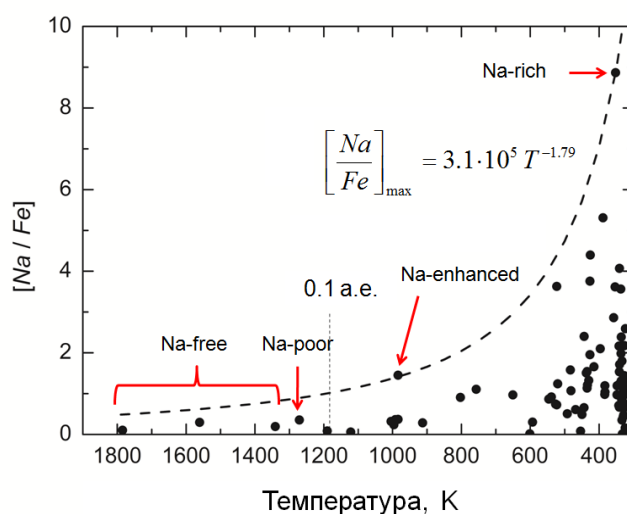


Рис. 4.23. Діаграма залежності відношення інтенсивностей спектральних ліній NaI-1 і FeI-15 в спектрах метеорів від температури (4.2) метеорних частинок. Пунктирною лінією позначена верхня межа відповідно до формул (4.2) і (4.12).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.

Комети сімейств Крейца, Марсдена і Крахта є постачальниками пилових частинок у міжпланетний простір, які спостерігаються на Землі не тільки у вигляді великих метеорних потоків, але й поповнюють спорадичний метеорний фон.

При плануванні спостережень близькосонячних спорадичних метеороїдів важливо знати особливості розташування їхніх радіантів на небесній сфері. Метеорні радіанти близькосонячних пилових частинок концентруються на геоцентричних екліптичних широтах приблизно 7° - 10° до півночі і півдня щодо екліптики. Спостереження необхідно проводити на

широкому інтервалі елонгацій від Сонця 120° - 165° (метеороїди, які перебувають на своїх геліоцентричних орбітах до проходження перигелію) і 20° - 60° (після проходження перигелію). Крім того, по елонгаціям радіантів спорадичних метеороїдів щодо Сонця кожна з “до” і “після” перигелійних областей радіантів розпадаються на дві групи. Розподіл по нахилу орбіт упевнено показують, що:

1. Група радіантів в інтервалі елонгацій 140° - 165° (з максимум у розподілі $\sim 155^{\circ}$) містить орбіти з перевагою по нахилам $\sim 10^{\circ}$ - 25° .

2. Група радіантів в інтервалі елонгацій 120° - 140° (з максимум у розподілі $\sim 135^{\circ}$) містить орбіти з перевагою по нахилам $\sim 145^{\circ}$.

3. В інтервалі елонгацій 20° - 60° виділяються дві групи радіантів. Так, максимуми в розподілі припадають на елонгації приблизно 50° і 30° . Ці групи радіантів містять орбіти з перевагою по нахилам приблизно 20° і 140° .

Таким чином, кожна із груп радіантів належать кометним сімействам: радіанти з елонгаціями від Сонця порядку 30° і 155° – сімействам комет Марсдена і Крахта, а радіанти з елонгаціями від Сонця порядку 50° і 135° – сімейству комет Крейца.

У розподілі по перигелійним відстаням спостерігається різке зменшення чисельності метеорних тіл з $q < 0,08$ а.о., що відповідає геліоцентричним відстаням 20 - 30 R_{\odot} , де завершується виробництво мікроскопічного пилу кометами. Передбачається, що це пов'язане з повною сублімацією більшості метеороїдів в областях близьких до Сонця. Ймовірно, існує навколосонячна зона радіусом 0,1 а.о., усередині якої, метеороїди найбільш піддані руйнуванню.

У розподілі по масах метеорних тіл виявляється відносне зменшення значень мас для близькосонячних пилових частинок, які зафіксовані на післяперигелійній частині орбіти. Це пояснюється випаровуванням частини речовини метеороїдів при проходженні перигелійної області.

Модельні розрахунки, засновані на кінетичній теорії випаровування (сублімації) речовин у вакуумі, підтверджують висновки про існування навколосонячної зони радіусом 0,1 а.о., усередині якої, метеороїди найбільш піддані руйнуванню. Не виключено, що метеороїди які “вижили” в близькосонячній зоні будуть мати відмінні фізико-хімічні характеристики.

Деякими авторами вказується на існування залежності вмісту хімічних елементів (Mg, Na, Fe) у пилових частинках як функції перигелійної відстані (для $q < 0,1$ а.о.) їхніх орбіт. Даний факт розглядають як результат термічного впливу на пилову частинку в близькосонячній області. Порівнюючи спектри метеорів, які викликані частинками зафіксованих на ділянках своїх траєкторій “до” і “після” проходження близькосонячної області, можна оцінити ефект термодесорбції. Але це питання ще належить вивчити в майбутньому, що вимагає розробку придатної спостережної апаратури, методів обробки спостережень, ґрунтуючись на результатах дисертаційної роботи, а також, проведення позиційних і спектральних спостережень метеорів.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота присвячена вирішенню сукупності наукових завдань метеорної астрономії, що пов'язані з удосконаленням методів спостережень, обробки спостережного матеріалу й аналізу отриманих результатів для вивчення кінематичних і фізичних властивостей небесних тіл, які при зіткненні із Землею мають на небесній сфері радіанти поблизу Сонця. До їхнього числа відносяться астероїди і комети, що перетинають земну орбіту й підходять до Землі із внутрішньої частини Сонячної системи з геліоцентричних відстаней ≤ 1 а.о. Відомими прикладами таких небесних тіл є: астероїд 99942 Apophis (2004 MN₄), астероїд 2008 TC₃ (зіткнення із Землею відбулося 7 жовтня 2008 року), Челябінський метеороїд (зіткнення із Землею відбулося 15 лютого 2013 року). Подібні об'єкти представляють найбільшу потенційну погрозу для Землі через відсутність сучасних технічних можливостей їхньої завчасної фіксації ще на підльоті до Землі. Ще одним класом небесних тіл з радіантами поблизу сонячної й антисонячної області неба які несуть потенційну погрозу в навколоземному просторі, є т.зв. “дряпаючі Сонце” комети (Sun-grazing comet) або SOHO-комети. При зближенні із Землею небезпечні як самі комети, так і пилові частинки й великі уламки, що утворилися в результаті дефрагментації комет поблизу Сонця. Причому фізичні процеси, пов'язані із Сонцем (сонячний вітер, гравітаційний вплив, високі температури й т.д.) на близьких відстанях приводять до часткового або повного розсіювання кометних роїв, випаровуванню кометних пилових частинок, зміні фізико-хімічних властивостей речовини метеороїдів.

З іншого боку, близькосонячні комети є потужними постачальниками метеороїдів в атмосферу Землі. Близькосонячні пилові частинки, досягаючи Землі та вторгаючись у її атмосферу з космічними швидкостями, можуть проявлятися у вигляді метеорів. Виділяючи і досліджуючи їх можна виявити розходження фізичних властивостей та хімічного складу від інших

метеороїдів, а також установити й пояснити причини цих розходжень. Таким чином, існує можливість вивчення близькосонячної пилової речовини методами метеорної астрономії.

Виходячи зі сформульованої мети дисертації, були поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Створена і досліджена автоматизована апаратура (метеорний патруль) для відеоспостережень телескопічних (до $+10^m$ видимої яскравості) метеорів з високими часовими й позиційними роздільними здатностями.

2. Створено Одеську базу даних телескопічних метеорних спостережень в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова (більше 11000 метеорів до $+10^m$ за період спостережень 2003 - 2017 рр.).

3. Удосконалено методику спостережень, первинної обробки отриманого спостережного матеріалу, розрахунку основних атмосферних і позаатмосферних кінематичних параметрів метеорів за телескопічними відеоспостереженнями із двох віддалено розташованих пунктів (з відстанню ~ 152 км між кореспондуючими пунктами). Методика реалізована у вигляді пакета програмного забезпечення.

4. Проведено позиційну обробку спостережного матеріалу, отриманого під час базисних (з відстанню 152.7 км між кореспондуючими пунктами) телескопічних відеоспостережень у серпні 2010 і 2011 роках. Отримано атмосферні та позаатмосферні кінематичні параметри (з оцінками погрешностей) метеорних тіл.

5. Удосконалено методику для обчислення кінематичних параметрів метеоритоутворювальних болідів, що спостерігались у світлий час доби. Метод застосований для обчислення атмосферних та позаатмосферних кінематичних параметрів Челябінського метеороїда під час його падіння на поверхню Землі 15 лютого 2013 р.

6. Вивчено особливості термічного впливу на фізико-хімічні властивості метеорних тіл, які зближуються із Сонцем на геліоцентричні

відстані менше 0,1 а.о. за допомогою накопичених науковим співтовариством позиційних, фотометричних і спектральних спостережень метеорів, із залученням результатів експериментальних досліджень по випаровуванню зразків метеоритів, аналізу спостережної бази даних близькосонячних комет і метеорів.

У ході розв'язання основного завдання дисертаційної роботи отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Дослідження створеної спостережної апаратури (метеорний патруль) на основі монохромної CCTV-камери фірми Watec: LCL-902K, WAT-902H2 або аналогічних по технічних параметрах камер і застосуванням об'єктивів з фокусною відстанню 140 мм і більше, показали її придатність для спостереження метеорів з високими часовими та позиційними роздільними здатностями. Так, відтворюваність обчислення геодезичних координат підметеорних точок по довготі ($\Delta\lambda$) і широті ($\Delta\phi$) становить порядку $\pm 1''$ (20 - 30 м) і менше. Відтворюваність обчислених лінійних висот метеорів над земною поверхнею в середньому менше 100 метрів. При вдалому розташуванні метеорної траєкторії щодо кореспондуючих пунктів спостережень для зафіксованих оптичними системами загальних ділянок траєкторії метеора лінійні висоти визначаються з відтворюваністю 0,01 км. Похибка визначення метеорної траєкторії на небесній сфері $10'' - 12''$. Похибка обчислення полюса великого кола метеорної траєкторії $3' - 13'$. Похибка визначення радіанта метеора $0,5^\circ - 1,5^\circ$. Атмосферна швидкість визначається з погрішністю не гірше 3%.

2. Позиційна обробка спостережного матеріалу отриманого під час базисних (152,7 км) спільних спостережень у Крижанівці (Одеса) і на острові Зміїний (Одеська обл.) у серпні 2010 і 2011 роках показала: усього за час спостережень зареєстровано 150 метеорів, з яких 10 метеорів є базисними. Для них були визначені кінематичні параметри і елементи геліоцентричних

орбіт. Серед базисних метеорів зафіксовані 2 метеороїди з близькосонячної області.

3. У розподілі метеорних частинок по перигелійним відстаням спостерігається різке зменшення чисельності метеорних тіл з $q < 0,08$ а.о., де завершується виробництво мікроскопічного пилу в результаті сублімації кометних ядер при наближенні їх до Сонця. Робиться висновок про існування зони на геліоцентричній відстані $\sim 0,1$ а.о., з якої при наближенні до Сонця починається істотне випаровування речовини метеороїдів.

4. У розподілі по масах метеорних тіл виявлено відносне зменшення значень мас для близькосонячних пилових частинок, які зафіксовані на післяперигелійній частині орбіти. Це пояснюється випаровуванням частини речовини метеороїдів при проходженні перигелійної області.

5. Виявлено нові групи і підгрупи метеорних радіантів, пов'язаних із частинками близькосонячного спорадичного пилового фону. Кожна із груп радіантів належать кометним сімействам: радіанти з елонгаціями від Сонця порядку 30° і 155° - сімействам комет Марсдена і Крахта, а радіанти з елонгаціями від Сонця порядку 50° і 135° - сімейству комет Крейца.

6. Модельні розрахунки, побудовані на кінетичній теорії випаровування (сублімації) речовин у вакуумі, підтверджують висновки про існування близькосонячної зони радіусом $0,1$ а.о., усередині якої, метеороїди найбільш піддані руйнуванню. Не виключено, що метеороїди які “вижили” в близькосонячній зоні будуть мати залежність вмісту хімічних елементів (Mg, Na, Fe) у пилових частинках як функції перигелійної відстані (для $q < 0,1$ а.о.) їхніх орбіт. Існує невелика кількість спостережень, які вказують на таку залежність. Порівнюючи спектри метеорів, які викликані частинками зафіксованими на ділянках своїх траєкторій “до” і “після” проходження близькосонячної області, можна оцінити даний ефект. Це питання є перспективою подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V., Kimakovsky S.R., Kimakovskaya I.I., Knyaz'kova E.F., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Shestopalov V.A., Stogneeva I.A., Zhukov V.V.* Preliminary results of television telescopic observations of meteors in Odessa //International Scientific Workshop "Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes" Nikolaev-2004, May 17-20, Nikolaev, Ukraine. – 2004. – P. 41-42.
2. *Горбанев Ю.М., Голубаев А.В., Жуков В.В., Князькова Е.Ф., Кимаковский С.Р., Кимаковская И.И., Подлесняк С.В., Сарест Л.А., Стогнеева И.А., Шестопалов В.А.* Наблюдательный комплекс – метеорный патруль. Итоги наблюдательных сезонов 2003-2004 г.г. Международный научный семинар “Наблюдения искусственных спутников Земли и космического мусора”, 3-7 октября, 2004, Львов, Украина. – 2004.
3. *Голубаев А.В., Горбанев Ю.М., Князькова Е.Ф.* “Позиционные измерения телевизионных телескопических метеоров” (абстракт на английском языке) // Intern. Conf. SAMMAC-2005, Programme and Book of Abstracts. Vinnytsia, septembr 25 - october 1. – 2005. – P. 30.
4. *Gorbanev Yu., Golubaev A., Zhukov V., Knyazkova E., Kimakovsky S., Kimakovskaya I., Podlesnyak S., Sarest L., Stogneeva I., Shestopalov V.* Results of the TV patrol of the telescopic meteors in Odessa // Book of Abstracts. Memorial International Conference "Astronomy and space physics at Kyiv university". Kyiv, May 22-26. – 2005. – P. 35.
5. *Gorbanev Yu., Golubaev A., Zhukov V., Kimakovskaya I., Kimakovsky S., Knyazkova E., Podlesnyak S., Sarest L., Stogneeva I., Shestopalov V.* “Some results of the TV meteor patrol in Odessa obtained during 2003-2006” // Abstract Book. International conference. Enlargement of collaboration in

- ground-based astronomical research in see countries. Studies of the near-earth and small bodies of the solar system. Nikolaev, Ukraine. – 2006. – P. 34.
6. *Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V., Zhukov V.V., Knyaz'kova E.F., Kimakovskii S.R., Kimakovskaya I.I., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Stogneeva I.A., Shestopalov V.A.* Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors. // *Sol. Syst. Res.* – 2006. – V. 40. – Iss. 5. – P. 412 - 426.
 7. *Голубаєв О., Горбаньов Ю., Шестопалов В.* “Визначення радіантів метеорів за методом Станюковича” // Тези четвертої науков. конфер. пам. Богдана Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики, 19-21 жовтня 2006р.” Україна, Львів. – 2006. – С. 24.
 8. *Голубаєв А.В., Горбанев Ю.М.* Получение радиантов слабых телескопических метеоров по телевизионным наблюдениям. // Международная мемориальная научная конференция "Современные проблемы астрономии", посвященная 100-летию со дня рождения профессора Владимира Платоновича Цесевича. 12-18 августа 2007 г., Одесса, Украина. Сборник абстрактов. – 2007. – С. 12.
 9. *Горбанев Ю. М., Кимаковский С.Р., Князькова Е.Ф., Шестопалов В.А., Голубаев А.В.* Методика и программный комплекс для обработки метеорных наблюдений. // Международная мемориальная научная конференция "Современные проблемы астрономии", посвященная 100-летию со дня рождения профессора Владимира Платоновича Цесевича. 12-18 августа 2007 г., Одесса, Украина. Сборник абстрактов. – 2008. – С. 13.
 10. *Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V., Zhukov V.V., Kimakovskaya I.I., Kimakovsky S.R., Knyazkova E.F., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Stogneeva I.A., Shestopalov V.A.* Techniques for positional measurements of telescopic meteor TV images // *Sol. Syst. Res.* – 2008. – V. 42. – Iss. 1. – P. 35 – 50.
 11. *Голубаєв А.В., Горбанев Ю.М.* Радианты слабых телескопических метеоров по телевизионным наблюдениям // Труды Международной

- астрономической конференции “Околоземная астрономия - 2007”, 3-7 сентября 2007г., п. Терскол, Кабардино-Балкария, Россия. – 2008. – С. 258 - 263.
12. *Кимаковский С.Р., Горбанев Ю. М., Князькова Е.Ф., Шестопалов В.А., Голубаев А.В.* Методика и программное обеспечение для обработки наблюдений метеорного патрулирования // Труды Международной астрономической конференции “Околоземная астрономия - 2007”, 3-7 сентября 2007г., п. Терскол, Кабардино-Балкария, Россия. – 2008. – С. 247 - 251.
13. *Горбаньов Ю.М., Шестопалов В.О., Сарест Л.О., Голубаєв О.В.* Телевізійне метеорне патрулювання на о. Зміїний. // Острів Зміїний, 1 том (Абіотичні характеристики), 6 розділ. Монографія. Одеса, “Астропринт”. – 2008.
14. *Голубаев А.В., Горбанёв Ю.М., Жуков В., Кимаковский С.Р., Сарест Л.А., Шестопалов В.А.* Телевизионные наблюдения метеорного потока Леониды 2009 года в Одессе // Тезисы докладов, Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) "От эпохи Галилея до наших дней", Н. Архиз, 13-18 сентября 2010 г. – 2010. – С. 57.
15. *Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V.* Definition of poles of the large circles of meteoric trajectories. // Odessa Astronomical Publications. – 2009/2010. – V. 22. – P. 4 - 11.
16. *Голубаев А.В.* Основные характеристики движения метеороида при выпадении Челябинского метеоритного дождя 15 февраля 2013 года // Материалы международной конференции "Околоземная астрономия-2013", Туапсе, 7 - 11 октября 2013 г.. Сборник тезисов. – 2013. – P. 48 - 49.
17. *Голубаев А.В.* Короткоперигелийные ($q < 0,1$ а.е.) спорадические метеоры // Материалы международной конференции "Околоземная

астрономия-2013”, Туапсе, 7 - 11 октября 2013 г.. Сборник тезисов. – 2013. – Р. 113 - 114.

18. **Голубаев А.В.** “Основные характеристики движения метеороида при выпадении Челябинского метеоритного дождя 15 февраля 2013 года” // “Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль”: материалы международной научно-практической конференции (Чебаркуль, 21 - 22 июня 2013 г.) / Администрация Чебаркульского городского округа; Институт астрономии РАН; науч. ред.: В.А. Алексеев, А.В. Орлов, С.Г. Захаров, Е.В. Сюткина - Челябинск: “Край Ра”. – 2013. – 168 с.
19. *Krugly Y., Molotov I., Inasaridze R., Kvaratskhelia O., Aivazyan V., Rumyantsev V., Belskaya I., **Golubaev A.**, Sergeev A., Shevchenko V., Slyusarev I., Burkhonov O., Ehgamberdiev S., Elenin L., Voropaev V., Koupiyanov V., Gaftonyuk N., Baransky A., Irmambetova T., Litvinenko E., Aliev A., Namkhai T.* Results of near-Earth-asteroid photometry in the frame of the ASPIN programme. – Asteroids, Comets, Meteors 2014. Proceedings of the conference held 30 June - 4 July, 2014 in Helsinki, Finland. Edited by K. Muinonen et al. – 2014. – P. 317.
20. **Alexander Golubaev, Ivan Brukhanov, Anastasia Tabolich, Valentin Tabolich, Anastasia Kulakovskaya, Dmitry Akulich; Ivan Sergey** "Observing of Leonids, Draconids, Alpha Monocerotids, Epsilon-Perseid meteor showers. Investigating of technical possibilities of All-Sky camera on the example of searching for meteors of C/2012 (ISON) comet." // Book of Abstracts, 33rd International Meteor Conference, Giron. – 2014. Published at <http://www.imo.net/imc2014/2014-11-brukhanov-final.pdf>.
21. **Голубаев А.В.** “Околосолнечные пылевые частицы в спорадическом метеорном фоне” // Сборник абстрактов, Международная конференция "V Бредихинские чтения", Заволжск, Россия.2014. – С. 6. Опубликовано в <http://www.inasan.ru/rus/conferences/bredikhin2014/abstracts.pdf>.

22. **Golubaev A., Brukhanov I., Tabolich T., Tabolich A., Kulakovskaya and Sergey I.** “Preliminary results of observations in January, 2014 of a meteor shower of comet C/2012 S1 (ISON)” // Karri Muinonen, Antti Penttilä, Mikael Granvik, Anne Virkki, Grigori Fedorets, Olli Wilkman, and Tomas Kohout (eds.). Asteroids, Comets, Meteors // Book of Abstracts, Helsinki, Finland, University of Helsinki. – 2014. – P. 200. Published at <http://www.helsinki.fi/acm2014/pdf-material/ACM2014.pdf>.
23. **Golubaev A.V.** Main Parameters of Meteoroid Motion during the Fall of the Chelyabinsk Meteorite Shower on February 15, 2013 // Sol. Syst. Res. – 2015. – V. 49. – №. 3. – P. 147 - 158.
24. **Golubaev A.V.** Sungrazing Dust Particles against the Sporadic Meteor Background // Sol. Syst. Res. – 2015. – V. 49. – №. 4. – P. 226 - 236.
25. **Голубаев А.В.** Вычисление основных кинематических характеристик метеоров по наблюдениям на сверхдлинных базах // “Околоземная астрономия - 2015”. Труды международной конференции. 31 августа – 5 сентября 2015 г. П. Терскол – М.: Янус-К, 2015 – 324 с.
26. **Golubaev A.V.** “A technique for calculating the basic kinematic parameters of meteors based on the super-long station observations (~152 km)” // 5-th Gamow International Conference in Odessa “Astrophysics and Cosmology after Gamow: progress and perspectives”, 16-23 August, 2015, Odessa, Ukraine. – 2015. – P. 66.
27. **Thuillot W., Bancelin D., Ivantsov A., Desmars J., Assafin M., Ettl S., Hestroffer D., Rocher P., Carry B., David P., Golubaev A.V., and 64 coauthors.** The astrometric Gaia-FUN-SSO observation campaign of 99942 Apophis. // Astronomy & Astrophysics. – 2015. – V. 583. – id. A59. – 12 pp.
28. **Голубаев А.В.** “Физические и кинематические свойства спорадических пылевых частиц из околосолнечной области” // Труды международной конференции “V Бредихинские чтения”, 12 – 16 мая 2014, г. Заволжск, Россия. Изд. второе. – М.: Янус-К. – 2016. – С. 212 – 230.

29. *Горбанёв Ю.М., Шульга А.В., Козак П.Н., Голубаев А.В.* “Украинская метеорная оптическая сеть” // Международный научный семинар памяти Б.Л. Кащеева “Радиометеоры, метеоры и межпланетная составляющая: вблизи и на расстоянии” 15 марта 2016 года Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ), Харьков, Украина. // Сборник абстрактов. – 2016. – С. 38.
30. *Голубаев А.В.* “Физические свойства пылевых частиц, сближающихся с Солнцем на гелиоцентрические расстояния менее 0,1 а.е.” // Международный научный семинар памяти Б.Л. Кащеева “Радиометеоры, метеоры и межпланетная составляющая: вблизи и на расстоянии” 15 марта 2016 года Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ), Харьков, Украина. – Сборник абстрактов. – 2016. – С. 28.
31. *Горбанев Ю.М., Князькова Е.Ф., Шульга А.В., Куличенко Н.А., Козак П.Н., Мозговая А.М., Голубаев А.В.* “Украинская оптическая метеорная сеть” // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник “Радиотехника”. – 2016. – Вып. 185. – С. 5 - 8.
32. *Golubaev A.V.* “The thermal desorption of the dust particles substance near the Sun” // The International Conference: “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy”, September 26-29, 2016, Abstract Book. Mykolaiv. – 2016. – P. 10 – 11.
33. *Апати И, Васюкова З.В., Кащеев Б.Л.* Результаты исследования метеорного вещества на ИСЗ “Интеркосмос-14” и соответствующих наземных наблюдений метеоров // Космич. исслед. – 1981. – Т. 19. – №. 5. – С. 790 - 794.
34. *Астапович И.С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М. – 1958. – 640 с.

35. *Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И.* Фотографические наблюдения болидов в Таджикистане. // Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. – 2007. – Т. 50. – №. 1. – С. 27 - 36.
36. *Бабаджанов П.Б., Крамер Е.Н.* Методы и некоторые результаты фотографических исследований метеоров // Ионосфера и метеоры. – 1963. – №. 12. – 144 с.
37. *Багров А.В., Выгон В.Г., Бондарь С.Ф. и др.* Гибридная телевизионная система для наблюдения слабых космических объектов. // Сб. научных трудов конференции “Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы”. Обнинск 25-29. октября 1999 г. М.: Космосинформ. – 2000. – С. 334 - 346.
38. *Багров А.В., Бескин Г.М., Бирюков А. и др.* Широкоугольная высокоскоростная оптическая камера для обнаружения вспыхивающих и движущихся объектов // Сборник трудов конференции “Околоземная астрономия-2003”, Терскол, Санкт-Петербург. – 2003а. – Т. 2. – С 101 - 106.
39. *Багров А.В., Выгон В.Г., Бондарь С.Ф.* Задачи оперативных наблюдений тел естественного происхождения, движущихся через околоземное космическое пространство // Сборник трудов конференции “Околоземная астрономия-2003”, Терскол. Санкт-Петербург. – 2003б. – Т. 2. – С 29 - 41.
40. *Блажко С.Н.* История Московской обсерватории в связи с преподаванием астрономии в университете (1824-1920). // Уч. зап. МГУ, юбилейная сер. – 1941. – вып. LVIII. Астрономия. – 93 с.
41. *Видмаченко А.П., Ващенко Е.П., Ивченко В.Н., Санакова Е.В.* Опыт телевизионных наблюдений метеоров. // Астрономический Вестник. – 1976. – Т. 10. – №. 4. – С. 241 - 246.
42. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г.* Метеоры и метеорное вещество. – Киев: Наук. думка. – 1989. – 294 с.

43. *Гульмедов Х., Бегханов М., Поляков М., Хрушев Л.* Телевизионные наблюдения метеоров в Ашхабаде // *Астрономический циркуляр.* – 1971. – №. 607. – С. 6 - 7.
44. *Добровольский О.В.* *Кометы.* – М.: Наука. – 1966. – 288 с.
45. *Зиновьев В.Е.* *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах.* – Справ. изд., М.: Металлургия. – 1989. – 384 с.
46. *Иванников В.И.* Выбор объективной призмы для спектрофотометрии метеоров. – *Бюлл. ДАО.* – 1957. – №. 20. – С. 24.
47. *Каврайский В.В.* // *Зап. по гидрографии.* – 1926. – №. 41. – с. 5
48. *Казенас Е.К., Чижиков Д.М.* *Давление и состав пара над окислами химических элементов.* – М.: Наука. – 1976. – С. 1 - 342.
49. *Катасев Л.А.* *Исследование метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом* // *Гидрометеорологическое издательство.* Ленинград. – 1966. – 334 с.
50. *Кащеев Б.Л., Волощук Ю.И., Кручиненко В.Г.* *Метеоры и метеорное вещество.* – отв. ред. Крамер Е.Н. Киев: Наук. думка. – 1989. – 292 с.
51. *Кащеев Б.Л., Ткачук А.А.* *Результаты радиолокационных наблюдений слабых метеоров. Каталог орбит метеоров до +12^m.* – М. – 1980. – 232 с. – (Материалы Мирового центра данных Б).
52. *Кикоин И.К.* *Таблицы физических величин: Справочник.* отв. ред. Кикоин И.К.. Москва: Атомиздат. – 1976. – 1008 с.
53. *Коваленко В.Ф.* *Теплофизические процессы и электровакуумные приборы.* // М., “Сов. радио”. – 1975. – 216 с.
54. *Козак П.Н.* *Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров* // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2002. – Т. 18. №. 5. – С. 471 - 480.
55. *Козак П.Н.* *Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных*

- наблюдений // Кинематика и физика небесных тел. – 2003. – Т. 19. – №. 1. – С. 62 - 76.
56. *Козак П.Н., Рожило А.А.* Астрометрическая и фотометрическая точность измерений при цифровой обработке телевизионных широкоугольных снимков ас-тронических объектов // Вісник Астрономічної школи. – 2005. – Т. 4. №. 2. – С. 259 - 263.
57. *Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В.* Телевизионные наблюдения низкоорбитальных космических объектов с использованием способа накопления кадров со смещением // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. – №. 3. – С. 71 - 76.
58. *Корочанцев А.В., Абдрахимов А.М., Иванова М.А., Лоренц К.А., Рязанцев К.М., Демидова С.И., Садиленко Д.А., Бадюков Д.Д., Артемьева Н.А., Назаров М.А.* Уточнение траектории полета метеорита Челябинск по распределению его собранных фрагментов. // Материалы Международной научно-практической конференции “Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль (Чебаркуль, 21-22 июня 2013 г.)”. – 2013. – С. 118 – 121.
59. *Крамер Е.Н., Воробьева В.А., Руденко С.А.* Опыт работы на метеорном патруле Одесской астрономической обсерватории во время МГГ // Изв. Одесск. астрон. обсерв. – 1963. – Вып. 2. – С. 5 - 63.
60. *Крамер Е.Н., Шестака И.С.* Фотографические методы метеорной астрономии. Киев. – 1989. – 97 с.
61. *Кручиненко, В.Г.* Математико-фізичний аналіз метеорного явища: монографія / В.Г. Кручиненко; Головна астроном. обсерваторія НАН України, Нац. акад. наук України. – Київ: Наук. думка. – 2012. – 294 с.
62. *Куличенко Н.А., Шульга А.В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С.* Использование ТВ-камер для наблюдений метеоров // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18. – №. 6. – С. 67 - 72.

63. *Куличенко Н.А., Шульга А.В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С.* Телевизионные наблюдения метеоров в НИИ НАО // Вісник Астрономічної школи. – 2013. – Т. 9. – №. 1 - 2. – С. 107 - 110.
64. *Лебединец В.Н.* О происхождении метеорных роев типа Ариетид и Геминид. // Астрон. Вестн. – 1985. – Т. 19. – №. 2. – С. 152 - 157.
65. *Лебединец В.Н.* Торможение слабых фотографических метеоров и плотность метеорных тел // Астрон. Вестник. – 1987. – Т. 21. – №. 1. – С. 65 - 74.
66. *Лебединец В.Н., Манохина А.В.* Общность происхождения и эволюции метеорных тел, порождающих радио- и фотографические метеоры. // Астрон. Вестник. – 1981. – Т. 15. – №. 4. – С. 235 - 239.
67. *Лебединец В.Н., Манохина А.В.* Об учете селективности наблюдений метеоров. – *Астрономия и Геодезия: Сборник статей.* Под ред. Л.Е. Быковой. Вып. 11. – Томск: Изд-во Томск. Ун-та. – 1984. – С. 9 - 17.
68. *Мальшев И.Ф.* Телевизионные наблюдения метеоров в Душанбе в 1979 г. // Астрон. Вестник. – 1992. – Т. 26. – №. 1. – С. 112 - 114.
69. *Мартыненко В.В., Вагнер Л.Я, Кремнева Н.М. и др.* Структура радиантов и активность Персеид в 1971 г. // Астроном. вестн. – 1978. – Т. 12. – №. 4. – С. 235 - 243.
70. *Масленникова Е.С.* Телевизионные наблюдения метеорного потока Персеид и их обработка. // Сборник трудов конференции “Околоземная астрономия-2003”, Терскол, Санкт-Петербург. – 2003. – Т. 1. – С. 259 - 265.
71. *Михайлов А.А.* Курс общей астрофизики и звездной астрономии. – М.: – 1967. – 586 с.
72. *Питтих Э.М., Соловая Н.А.* Модели SOHO комет с орбитами близкими к параболическим. // Вісник Астрономічної школи. – 2004. – Т. 5. – №. 1 - 2. – С. 185 - 188.

73. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. Аэродинамика болидов. – М.: Наука. Физматлит. – 1995. – 240 с.
74. Соснова А.К. Применение методов фотографической астрономии к задачам метеорной астрономии. // Бюлл. Комиссии по кометам и метеорам Астрон. совета АН СССР. – 1959. – №. 4. – С. 19 - 33.
75. Ссылки на видеофайлы (дополнение к таблице 3.3):
 Каменск-Уральский¹, <http://www.youtube.com/watch?v=vB1-Q93RIPY>
 Екатеринбург (I)², <http://www.youtube.com/watch?v=1RqC0hjdak>
 Екатеринбург (II)³, <http://www.youtube.com/watch?v=P3mg435WoiE>
 Курган⁴, <http://video.yandex.ua/users/bob1221/view/1#>
 Аманкарагай⁵, <http://www.youtube.com/watch?v=ArCYr2V3VyA>
 Карталы⁶, <http://www.youtube.com/watch?v=3QQIBNMtdsw>
 Магнитогорск⁷, http://www.youtube.com/watch?v=Z_OYxWDUaI8
 Челябинск⁸, <http://www.youtube.com/watch?v=-TWOmZZ4kIo>
 Алга⁹, http://www.youtube.com/watch?v=EE_LampPEQg
 “М5”-перекресток Миасс¹⁰, <http://www.youtube.com/watch?v=GtBqypYKPrw>
 “М5”-перекр. Чебаркуль¹¹, <http://www.youtube.com/watch?v=9ONAtIGiyzc>
 Белорецк¹², <http://www.youtube.com/watch?v=hD2iySyG090>
 Троицк¹³, <http://www.youtube.com/watch?v=UjNpJXP7trQ#ws>
76. Старухина Л.В., Шкуратов Ю.Г. Модель спектральной зависимости альbedo многокомпонентных реголитоподобных поверхностей. // Астрон. Вестн. – 1996. – Т. 30. – №. 4. – С. 299 - 306.
77. Шульман Л.М. Ядра комет. // М.: Наука. Гл. ред. физ. - мат. лит. – 1987. – 232 с.
78. Шульман Л.М. Диагностика кометной пыли по собственному инфракрасному излучению. // А.А. – 1974. – №. 23. – С. 57 - 68.
79. Яковлев О.И., Шорников С.И. Экспериментальное изучение испарения хондритов и Са-Al-включений. // Вестник ОНЗ РАН. – 2011. – 3. – NZ6104. doi:10,2205/2011NZ000234.

80. *Albin T., Koschny D., Soja R., Srama R., Poppe B.* A Monte-Carlo based extension of the Meteor Orbit and Trajectory Software (MOTS) for computations of orbital elements. // Proceedings of the International Meteor Conference, Egmond, the Netherlands, 2-5 June 2016, Eds.: Roggemans, A.; Roggemans, P., ISBN 978-2-87355-030-1. – 2016. – P. 20 - 25.
81. *Allen C.W.* The spectrum F corona at the eclipse of 1940 October 1 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1946. – V. 106. – P. 137 - 150.
82. *Aleshkina E.Y., Kupriyanov V.V., Devyatkin A.V., Vereshchagina I.A., Slesarenko V.Y., L'vov V.N., Tsekmeyster S.D.* Astrometric and photometric studies of the asteroid 2008 TC3. // *Solar System Research.* – 2011. – T. 45. – №. 1. – P. 34 - 42.
83. *American Meteor Society (AMS)*, <http://www.amsmeteors.org/2013/02/large-daytime-fireball-hits-russia/>
84. *Artemieva N.A., Shuvalov V.V.* Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere. // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – P. 3297 - 3310.
85. *Azovskii A.N., Shuvalov V.V.* The influence of geometric shape on the motion of fragments of a dissociated meteoroid. // *Sol. Sys. Res.* – 2002. – V. 36. – №. 4. – P. 334 - 340.
86. *Baggaley W.J., Bennett R.G.T., Steel D.I., Taylor A.D.* The advanced meteor orbit radar facility // *AMOR. Q. J. R. Astron. Soc.* – 1994. – V. 35. – P. 293 - 320.
87. *Becklin, E.E.; Westphal, J.A.* Infrared Observations of Comet 1965f. // *Astroph. J.* – 1966. – №. 145. – P. 445 - 453.
88. *Beskin G., Bad'in V., Biryukov A. et al.* FAVOR (FAst Variability Optical Registration) – A two-telescope complex for detection and investigation of short optical transients // *Nuovo Cimento.* – 2005. – V. 28. – P. 751 - 754.
89. *Bentley Mark S., Schmied Roland, Mannel Thurid, Torkar Klaus, Jeszenszky Harald, Romstedt Jens, Levasseur-Regourd Anny-Chantal, Weber Iris,*

- Jessberger Elmar K., Ehrenfreund Pascale, Koeberl Christian, Havnes Ove* Aggregate dust particles at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. // *Nature*. – 2016. – V. 537. – Iss. 7618. – P. 73 - 75.
90. *Betlem Hans, Jenniskens Peter, van't Leven Jaap, Ter Kuile Casper, Johannink Carl, Zhao Haibin, Lei Chenming, Li Guanyou, Zhu Jin, Evans Steve, Spurney Pave.* Very precise orbits of the 1998 Leonid meteors. // *Meteor. Planet. Sci.* – 1999. – V. 34. – P. 979 - 986.
91. *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. – V. 174. – №. 1. – P. 15 - 30.
92. *Borovička J.* Meteoroid properties from meteor spectroscopy // *Meteoroids. Astron. Inst., Slovak Acad. Sci., Bratislava, 1999.* – P. 355-362.
93. *Borovička J., Miloš W. and Boček J.* Perseids. Temporal evolution of a Perseid fireball spectrum // *WGN, the Journal of the IMO.* – 2006. – 34:2. – P. 49 - 54.
94. *Borovička, J., Spurny, P., Shrbeny L.* Trajectory and orbit of the chelyabinsk superbolide. // *Electronic Telegram Central Bureau for Astronomical Telegrams, IAU.* – 2013. – № 3423.
95. *Borovička Jiří, Spurný Pavel, Brown Peter, Wiegert Paul, Kalenda Pavel, Clark David, Shrbený Lukáš* The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. // *Nature*. – 2013. – V. 503. – Iss. 7475. – P. 235 - 237.
96. *Borovička J., Shrbený L., Kalenda P., Loskutov N., Brown P., Spurný P., Cooke W., Blaauw R., Moser D.E., Kingery A.* A catalog of video records of the 2013 Chelyabinsk superbolide. // *Astronomy & Astrophysics.* – 2016. – V. 585. – id. A90. – 35 pp.
97. *Brown R.H., Cruikshank D.P., Griep D.* Temperature of comet IRAS-Araki-Alcock (1983d) // *Icarus (ISSN 0019-1035).* – 1985. – V. 62. – P. 273 - 281.

98. *Brown P., Weryk R.J., Wong D.K., Jones J.* A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar. I. Methodology and radiant catalogue. // *Icarus*. – 2008. – V. 195. – №. 1. – P. 317 - 339.
99. *Brown P., Weryk R.J., Wong D.K., Jones J.* The Canadian Meteor Orbit Radar meteor stream catalogue. – *Earth, Moon Planets.*, 2008. V. 102. P. 209-219.
100. *Currie M.J.* A Short-Duration Telescopic Shower // *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. – 1995. – V. 23. – №. 4. – P. 151 - 154.
101. *Ceplecha Z.* Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks. // *Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin (ISSN 0004-6248)*. – 1987. – V. 38. – P. 222 - 234.
102. *Codina J.M. et al.* Study of the astrometric accuracy of photographic plates obtained with standard astrographs // *AJ*. – 1992. – V. 103. – №. 5. – P. 1687 - 1688.
103. *Davis C.J., Davies J.A., St Cyr O.C., Campbell-Brown M., Skelt A., Kaiser M., Meyer-Vernet Nicole; Crothers S., Lintott C., Smith A., Bamford S., Baeten E.M.L.* The distribution of interplanetary dust between 0,96 and 1,04 au as inferred from impacts on the STEREO spacecraft observed by the heliospheric imagers. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2012. – V. 420. – P. 1355 - 1366.
104. *De Lignie M.* Astro record 3.0. Radiant. // *J. Dutch Meteor Soc.* – 1997. – V. 19. – P. 28 - 30.
105. *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* The Chelyabinsk superbolide: a fragment of asteroid 2011 EO40? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. – 2013. – V. 436. – Iss. 1. – p. L15-L19.
106. *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* Reconstructing the Chelyabinsk event: pre-impact orbital evolution. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. – 2014. – V. 443. – Iss. 1. – p. L39-L43.

107. *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., Aarseth S.J.* Chasing the Chelyabinsk asteroid N-body style. // *Astrophysical Journal*. – 2015. – V. 812. – Iss. 1. – art. id. 26. – 22 pp.
108. *Dikarev Valery V., Schwarz Dominik J.* Microwave thermal emission from the zodiacal dust cloud predicted with contemporary meteoroid models. // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V. 584. – id.A9. – 18 pp.
109. *Divine N.* A simple radiation model of cometary dust for P/Halley. // In *ESA The Comet Halley Dust and Gas Environ.* – 1981. – P. 47 - 53 (SEE N82-23095 13-91).
110. *Dmitriev Vasily, Lupovka Valery, Gritsevich Maria* Orbit determination based on meteor observations using numerical integration of equations of motion. // *Planetary and Space Science*. – 2015. – V. 117. – P. 223 - 235.
111. *Dumont R., Levasseur-Regourd A.C.* Properties of interplanetary dust from infrared and optical observations. I - Temperature, global volume intensity, albedo and their heliocentric gradients. // *Astron. and Astroph.* – 1988. – V. 191. – №. 1. – P. 154 - 160.
112. *Emel'Yanenko Vacheslav V., Naroenkov Sergey A., Jenniskens Peter, Popova Olga P.* The orbit and dynamical evolution of the Chelyabinsk object. // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2014. – V. 49. – Iss. 12. – P. 2169 - 2174.
113. *Fray Nicolas, Bardyn Anaïs, Cottin Hervé, Altwegg Kathrin, Baklouti Donia, Briois Christelle, Colangeli Luigi, Engrand Cécile, Fischer Henning, Glasmachers Albrecht, Grün Eberhard, Haerendel Gerhard, Henkel Hartmut, Höfner Herwig, Hornung Klaus, Jessberger Elmar K., Koch Andreas, Krüger Harald, Langevin Yves, Lehto Harry, Lehto Kirsi, Le Roy Léna, Merouane Sihane, Modica Paola, Orthous-Daunay François-Régis, Paquette John, Raulin François, Rynö Jouni, Schulz Rita, Silén Johan, Siljeström Sandra, Steiger Wolfgang, Stenzel Oliver, Stephan Thomas, Thirkell Laurent, Thomas Roger, Torkar Klaus, Varmuza Kurt, Wanczek Karl-Peter, Zaprudin Boris, Kissel Jochen, Hilchenbach Martin* High-molecular-weight organic matter in

- the particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. // *Nature*. – 2016. – V. 538. – Iss. 7623. – P. 72 - 74.
114. *Fujiwara Y., Ueda M, Kawasaki Y, Nakamura T.* TV Observation of the Leonid Meteor Shower in 2002: First Observation of a Faint Meteor Storm // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2003. – V. 55. – №. 6. – P. 1157 - 1162.
115. *Furusho Reiko, Kawakita Hideyo, Fujii Mitsugu, Watanabe Jun-ichi* Heliocentric Dependence of Sodium Emission of Comet Hale-Bopp (C/1995O1). // *Astroph. J.* – 2005. – V. 618. – №. 1. – P. 543 - 546.
116. *Galligan D., Baggaley J.W.* The radiant distribution of AMOR radar meteors. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2005. – V. 359. – P. 551 - 560.
117. *Gattrell G., Elford W.G.* Southern hemisphere meteor stream determination. // *Aust. J. Phys.* – 1975. – V. 8. – P. 591 - 620.
118. *Gehrels T., Marsden B.G., McMillan R.S., Scotti J.V.* Astrometry with a scanning CCD. // *AJ.* – 1986. – V. 91. – №. 5. – P. 1242 - 1243.
119. *Gorbanev, Y.M.* Odessa Television Meteor Patrol // *Odessa Astronomical Publications*. – 2009. – V. 22. – P. 60 - 67.
120. *Gorbanev Yu.M., Knyaz'kova E.F.* Young Meteor Swarms Near the Sun: I. Statistical Correlation of Meteors with Families of Short-Perihelion Comets. // *Solar Sys. Res.* – 2003. – V. 37. – №. 6. – P. 506 - 518.
121. *Gorbanev Yu.M., Kimakovsky S.R., Knyazkova E.F.* Positional Measurements of the Meteor TV Images // *Odessa Astronomical Publications*. – 2009. – V. 22. – P. 12 - 20.
122. *Green D.W.E., Rickman H., Porter A.C., Meech K.J.* The strange periodic comet Machholz. // *Science*. – 1990. – V. 247. – P. 1063 - 1067.
123. *Gulyaev R.A., Shcheglov P.V.* The Search for the Outer Boundary of the Dust-Free Zone Around the Sun. // *ASP Conf. Ser*, Ed. by Costas E. Alissandrakis & Brigitte Schmieder. – 1998. – P. 413 - 415.

124. *Gural Peter S.* A new method of meteor trajectory determination applied to multiple unsynchronized video cameras. // *Meteoritics & Planetary Science.* – 2012. – V. 47. – Iss. 9. – P. 1405 - 1418.
125. *Hajdukova M.Jr., Kornos L., Poth J.* Frequency of hyperbolic and interstellar meteoroids. // *MPS.* – 2014. – V. 49. – №. 1. – P. 63 - 68.
126. *Hawkes R.L., Bussey J.E., Macphee S.L., Pollock C.S., Taggart L.W.* Techniques for high resolution meteor light curve investigations // *Proc. Meteoroids 2001 Conf., 610 August 2001, Krunka, Sweden / Ed. Warmbein B.* ESA SP-495. Noordwijk: ESA Publ. Divis. – 2001. – P. 281 - 286.
127. *Hawkes R. L., Jones J.* A quantitative model for the ablation of dustball meteors. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 1975. – V. 173. – P. 339 - 356.
128. *Hawkes R.L., Jones J.* Two station television meteor studies // *Proceedings of the Symposium, Ottawa, Canada, August 27-30, 1979. (A81-27751 11-89)* Dordrecht, D. Reidel Publishing Co. – 1980. – P. 117 - 120.
129. *Hofmann W., Lemke D., Thum C., Fahrback U.* Observations of the Zodiacal Light at 2,4 μm . // *Nature Phys. Science.* – 1973. – V. 243. – №. 130. – P. 140- 141.
130. *Huebner W.F.* Dust from cometary nuclei. // *Astronomy and Astrophysics.* – 1970. – V. 5. – P. 286 - 297.
131. *Ishiguro Masateru, Watanabe Jun-ichi, Sarugaku Yuki, Ootsubo Takafumi, Kuroda Daisuke, Honda Mitsuhiro, Miyata Takashi, Yanagisawa Kenshi, Mito Hiroyuki, Fukushima Hideo, Niwa Takahiro, Sakamoto Makoto, Narusawa Shin-ya, Akisawa Hiroki* 2007 Outburst of 17P/Holmes: The Albedo and the Temperature of the Dust Grains. // *Astrophysical J.* – 2010. – V. 714 – №. 2. – P. 1324 - 1333.
132. *Jacchia L.G., Whipple F. L.* Precision orbits of 413 photographic meteors. // *Smithson. Contr. Astrophys.* – 1961. – V. 4. – №. 4. – P. 97 - 129.

133. *Janssen M.* Academie des Sciences. L'eclipse totale du 6 mai 1883 et la constitution physique du Soleil. *L'Astronomie*. – 1883. – V. 2. – P. 21 - 24.
134. *Jenniskens P., Gural P.S., Dynneson L., Grigsby B.J., Newman K.E., Borden M., Koop M., Holman D.* CAMS: Cameras for Allsky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers. // *Icarus*. – 2011. – V. 216. – Iss. 1. – P. 40 - 61.
135. *Johannink C.* Results of the CAMS project in 2012 // *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. – 2013. – V. 41. – №. 6. – P. 184 - 189.
136. *Jopek T.J., Valsecchi G.B.* From meteor observations to meteoroid orbits: propagation of uncertainties. // *EPSC Abstracts*. EPSC2010-888. – 2010. – V. 5.
137. *JPL (2008TC3)* “JPL Small-Body Database Browser: (2008 TC3)” (last observation: 2008-10-07). Jet Propulsion Laboratory.
138. *JPL* March 1, 2013, Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013, <http://neo.jpl.nasa.gov/news/>
139. *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. – V. 453. – №. 2. – P. L17 - L20.
140. *Kelsall T., Weiland J.L., Franz B.A., Reach W.T., Arendt R.G., Dwek E., Freudenreich H.T., Hauser M.G., Moseley S.H., Odegard N.P., Silverberg R.F., Wright E.L.* The COBE Diffuse Infrared Background Experiment Search for the Cosmic Infrared Background. II. Model of the Interplanetary Dust Cloud. // *Astrophys. J.* – 1998. – V. 508. – №. 1. – P. 44 - 73.
141. *Kero J., Szasz C., Nakamura T., Meisel D.D., Ueda M., Fujiwara Y., Terasawa T., Nishimura K., Watanabe J.* The 2009 - 2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: radiant densities and diurnal rates. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2012. – V. 425. – №. 1. – P. 135 - 146.

142. *Knight M.M.* Studies of SOHO comets. // Proquest Dissertations And Theses. (Ph.D. dissertation). United States, Maryland: University of Maryland, College Park. – 2008. – Section 0117. – Part. 0606. – pp. 202.
143. *Knight M.M., Battams K.* Preliminary Analysis of SOHO/STEREO Observations of Sungrazing Comet ISON (C/2012 S1) around Perihelion. // *Astrophys. J. Let.* – 2014. – V. 782. – №. 2. – article id. L37. – 5 pp.
144. *Koschny D.* Comparing two potential meteor cameras - the Mintron and the Watec 120N // *Proc. Int. Meteor Conf. September 19-21, 2003. Bollmannsruh, Germany / Eds Triglav-Cekada M., Trayner C. Int. Meteor Organization.* – 2004. – P. 59 - 63.
145. *Koschny D., Diaz del Rio J.* Meteor Orbit and Trajectory Software (MOTS) - Determining the Position of a Meteor with Respect to the Earth Using Data Collected with the Software MetRec. // *WGN, Journal of the International Meteor Organization.* – 2002. – V. 30. – №. 4. – P. 87 - 101.
146. *Koten P., Spurny S., Borovicka J., Stork R.* Catalogue of video meteor orbits. Part 1. – *Publ. Astron. Inst. ASCR.*, 2003. V. 91. P. 1-32.
147. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. // *Astron. J.* – 1962. – V. 67. – P. 591 - 598.
148. *Kozak P.* “Falling Star”: Software for processing of double-station TV meteor observations. // *Earth, Moon, and Planets.* – 2008. – V. 102. – №. 1 - 4. – P. 277 - 283.
149. *Kozak P.M., Rozhilo A.A., Taranukha Y.G.* Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors // *Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference.* – Kiruna, Sweden, 6-10 August, 2001, ESA-SP 495, Editor Barbara Warmbein. – 2001. – P. 337 - 342.
150. *Kresakova M.* The performance of telescopes for the observation of meteors // *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia.* – 1978. – V. 29. – №. 1. – P. 50 - 56.
151. *Kroll P.* Photographic and CCD sky patrols with small telescopes // *Astron. Gesellschaft. Abstracts of contributed talks and posters presented the Annual*

- sci. meeting of the Astron. Gesellschaft at the Joint European and National meeting JENAM 2001 of the European astron. soc. and the Astron. Gesellschaft at Munich, September 10-15. – 2001a. – V. 18. – 229 p.
152. *Kroll P.* Whole-sky patrol with 7k x 4k-CCD Chips // Astron. Gesellschaft. Abstracts of contributed talks and posters presented at the Annual sci. meeting of the Astron. Gesellschaft at the Joint European and National meeting JENAM 2001 of the European astron. soc. and the Astron. Gesellschaft at Munich, September 10-15, 2001. Abstract. – 2001b. – V. 18. – 229 p.
153. *Kroll P., Fleischmann F.* Whole-sky patrol with 7k x 4k-CCD chips // Astron. Nachr. – 201. – V. 322. – №. 5 - 6. – P. 315 - 316.
154. *Krüger Harald, Stephan Thomas, Engrand Cécile, Briois Christelle, Siljeström Sandra, Merouane Sihane, Baklouti Donia, Fischer Henning, Fray Nicolas, Hornung Klaus, Lehto Harry, Orthous-Daunay Francois-Régis, Rynö Jouni, Schulz Rita, Silén Johan, Thirkell Laurent, Trieloff Mario, Hilchenbach Martin* COSIMA-Rosetta calibration for in situ characterization of 67P/Churyumov-Gerasimenko cometary inorganic compounds // Planetary and Space Science. – 2015. – V. 117. – P. 35 - 44.
155. *Kulichenko N., Shulga O., Kozyryev Y. and Sybiryakova Y.* Double station observation of meteors in Nikolaev // WGN, Journal of the International Meteor Organization. – 2015. – Vol. 43. №. 3. – P. 81 - 84.
156. *MacQueen R.M.* Infrared Observations of the Outer Solar Corona. // Astrophys. J. – 1968. – V. 154. – 1059 - 1076.
157. *Madiedo, José M.* Robotic systems for the determination of the composition of solar system materials by means of fireball spectroscopy. // Earth, Planets and Space. – 2014. – V. 66. – article id.70. – 9 pp.
158. *Madiedo J.M., Toscano F.M., Trigo-Rodriguez J.M., Lacruz J.* Spectroscopy and orbital analysis of a sporadic fireball imaged in 2010. // EPSC Abstracts. – 2011. – V. 6. – P. 1808.

159. Mann I., Czechowski A., Meyer-Vernet N., Zaslavsky A., Lamy H. Dust in the interplanetary medium. // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2010. – V. 52. – №. 12.
160. Mann I., Kimura H., Biesecker D.A., Tsurutani B.T., Grün E., McKibben R., Bruce Liou Jer-Chyi, Mac-Queen R.M., Mukai T., Guhathakurta M., Lamy P. Dust near the Sun // Space Sci. Rev. – 2004. – V. 110. – №. 3. – P. 269 - 305.
161. Marchi S., Delbo' M., Morbidelli A., Paolicchi P., Lazzarin M. Heating of near-Earth objects and meteoroids due to close approaches to the Sun. // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2009. – V. 400. – №. 1. – P. 147 - 153.
162. McCrosky R.E., Posen A. Orbital Elements of Photographic Meteors. // Smithsonian. Contr. Astrophys. – 1961. – V. 4. – P. 15 - 84.
163. McIntosh B.A. Comet P/Machholtz and the Quadrantid meteor stream. // Icarus. – 1990. – V. 86. – P. 299 - 304.
164. Merouane Sihane, Zaprudin Boris, Stenzel Oliver, Langevin Yves, Altobelli Nicolas, Della Corte Vincenzo, Fischer Henning, Fulle Marco, Hornung Klaus, Silén Johan, Ligier Nicolas, Rotundi Alessandra, Ryno Jouni, Schulz Rita, Hilchenbach Martin, Kissel Jochen, Cosima Team Dust particle flux and size distribution in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by the COSIMA instrument on board Rosetta // Astronomy & Astrophysics. – 2016. – V. 596. – id. A87. – 12 pp.
165. Moroz Lyuba, Baratta Giuseppe, Strazzulla Giovanni, Starukhina Larissa, Dotto Elisabetta, Barucci Maria Antonietta, Arnold Gabriele, Distefano Elisa Optical alteration of complex organics induced by ion irradiation: 1. Laboratory experiments suggest unusual space weathering trend. // Icarus. – 2004. – V. 170. – P. 214 - 228.
166. Murray Ian.S, Beech Martin, Schroeder M. Leonid light curve morphology: review of 1998-2001 data // Proc. Int. Conf. Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002. 29 July-2 August 2002. Berlin, Germany / Ed. Warmbein B. ESA SP-500. Noordwijk, Netherlands: ESA Publ. Div. – 2002. – P. 297 - 299.

167. *Neslusan, L. Svoren, J. Porubcan V.* A computer program for calculation of a theoretical meteor-stream radiant. // *Astron. and Astrophys.* – 1998. – V. 331. – P. 411 - 413.
168. *Ney Edward P.* Infrared Observations of Comet Kohoutek Near Perihelion. // *Astroph. J.* – 1974. – V. 189. – P. L141 - L143.
169. *Nillson C.S.* A southern hemisphere radio survey of meteor streams. // *Aust. J. Phys.* – 1964. – V. 17. – P. 205 - 256.
170. *Ootsubo T., Usui F., Takita S., Watanabe J., Yanamandra-Fisher P., Honda M., Kawakita H., Furusho R.* Mid-infrared observations of sungrazing comet C/2012 S1 (ISON) with the Subaru Telescope. // *Asteroids, Comets, Meteors 2014. Proceedings of the conference held 30 June - 4 July, 2014 in Helsinki, Finland.* Edited by K. Muinonen et al. – 2014. – P. 417.
171. *Öpik E.J.* Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter // *Proc. Roy. Irish Acad.* – 1951. – V. 54. – sect. A. – №. 2. – P. 165 - 199.
172. *Passey Q.R., Melosh H.J.* Effects of atmospheric breakup on crater field formation. // *Icarus.* – 1980. – V. 42. – №. 2. – P. 211 – 233.
173. *Pawłowski J.F., Hebert T.J., Hawkes R.L., Matney M.J., Stansbery E.G.* Flux of very faint Leonid meteors observed with a 3 m liquid mirror telescope intensified CCD system // *Meteoritics Planet. Sci.* – 2001. – V. 36. – №. 11. – P. 1467 - 1477.
174. *Peterson A.W.* Thermal Radiation from Interplanetary Dust. // *Astrophys. J.* – 1963. – V. 138. – P. 1218 - 1230.
175. *Peterson A.W.* Experimental Detection of Thermal Radiation from Interplanetary Dust. // *Astrophys. J.* – 1967. – V. 148. – P. L37 - L39.
176. *Poole L.M.G.* The structure and variability of the helion and antihelion sporadic meteor sources. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1997. – V. – 290. – P. 245 - 259.

177. *Popova Olga P., Jenniskens Peter, Emel'yanenko Vacheslav, Kartashova Anna, Biryukov Eugeny, Khaibrakhmanov Sergey, Shuvalov Valery, Rybnov Yuriy, Dudorov Alexandr, Grokhovsky Victor I., Badyukov Dmitry D., Yin Qing-Zhu, Gural Peter S., Albers Jim, Granvik Mikael, Evers Láslo G., Kuiper Jacob, Kharlamov Vladimir, Solovyov Andrey, Rusakov Yuri S., Korotkiy Stanislav, Serdyuk Ilya, Korochantsev Alexander V., Larionov Michail Yu., Glazachev Dmitry, Mayer Alexander E., Gisler Galen, Gladkovsky Sergei V., Wimpenny Josh, Sanborn Matthew E., Yamakawa Akane, Verosub Kenneth L., Rowland Douglas J., Roeske Sarah, Botto Nicholas W., Friedrich Jon M., Zolensky Michael E., Le Loan, Ross, Daniel, Ziegler Karen, Nakamura Tomoki, Ahn Insu, Lee Jong Ik, Zhou Qin, Li Xian-Hua, Li Qiu-Li, Liu Yu, Tang Guo-Qiang, Hiroi Takahiro, Sears Derek, Weinstein Ilya A., Vokhmintsev Alexander S., Ishchenko Alexei V., Schmitt-Kopplin Phillipe, Hertkorn Norbert, Nagao Keisuke, Haba Makiko K., Komatsu Mutsumi, Mikouchi Takashi, aff34 Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization. // Science (Supplementary Materials). – 2013. – V. 342. DOI: 10.1126/science.1242642*
178. *Pravec P.* The 1992 Quadrantid maximum telescopically // *Proc. Int. Meteor Conf. Smolenice, Slovakia, 2-5 July 1992.* – 1992. – P. 63 - 66.
179. *Pravec P, Bocek J.* Statistical results about the precision of telescopic records of meteors // *Proc. Int. Meteor conf., 19-22 September, 1991. Potsdam, Germany / Eds Roggemans P., Arlt R. Int. Meteor Organization.* – 1991. – P. 48 - 53.
180. *Protopapa Silvia, Sunshine Jessica M., Feaga Lori M., Kelley Michael S. P., A'Hearn Michael F., Farnham Tony L., Groussin Olivier, Besse Sebastien, Merlin Frédéric, Li Jian-Yang* Water ice and dust in the innermost coma of comet 103P/Hartley 2. // *Icarus.* – 2014. – V. 238. – P. 191 - 204.

181. *Proud S.R.* Reconstructing the orbit of the Chelyabinsk meteor using satellite observations. // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – V. 40. – Iss. 13. – P. 3351 - 3355.
182. *Rafert J.B., Nemiroff R.J., Perez-Ramirez D., Pereira W., Ftaclas C., Ashe S.* CONCAM coverage of the 2001 Leonid meteor shower // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 199th AAS Meeting, id. 63.14. 2001. – V. 34. – P. 560.
183. *Rietmeijer Frans J.M.* At the interface of silica glass and compressed silica aerogel in Stardust track 10: Comet Wild 2 is not a goldmine. // *Meteoritics & Planetary Science*, Online Early. – 2016. – DOI:10.1111/maps.12608
184. *Schulz Rita, Hilchenbach Martin, Langevin Yves, Kissel Jochen, Silen Johan, Briois Christelle, Engrand Cecile, Hornung Klaus, Baklouti Donia, Bardyn Anaïs, Cottin Hervé, Fischer Henning, Fray Nicolas, Godard Marie, Lehto Harry, Le Roy Léna, Merouane Sihane, Orthous-Daunay François-Régis, Paquette John, Rynö Jouni, Siljeström Sandra, Stenzel Oliver, Thirkell Laurent, Varmuza Kurt, Zaprudin Boris* Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds dust coat accumulated over the past four years // *Nature*. – 2015. – V. 518. – Iss. 7538. – P. 216 - 218.
185. *Seismology*, Feb. 15, 2013, http://pts.mi-perm.ru/region/korkino_meteor.htm
186. *Sekanina Z.* Statistical model of meteor streams. III. Stream search among 19303 radio meteors. // *Icarus*. – 1973. – V. 18. – P. 253 - 284.
187. *Sekanina Z.* Statistical model of meteor streams. IV. A study of radio streams from the synoptic year. // *Icarus*. – 1976. – V. 27. – P. 265 - 321.
188. *Sekanina Z.* Solar And Heliospheric Observatory sungrazing Comets With Prominent Tails: Evidence On Dust-Production Peculiarities. // *Astroph. J.* – 2000. – V. 545. – №. 1. – P. L69 - L72.
189. *Sekanina Z., Chodas P.W.* Origin of the Marsden and Kracht Groups of Sunskirting Comets. I. Association with Comet 96P/Machholz and Its Interplanetary Complex. // *Astroph. J. Sup. Ser.* – 2005. – V. 161. – №. 2. – P. 551 - 586.

190. *Sekanina Z., Chodas P.W.* Comet C/2011 W3 (Lovejoy): orbit determination, outbursts, disintegration of nucleus, dust-tail morphology, and relationship to new cluster of bright sungrazers. // *Astroph. J.* – 2012. – V. 757. – №. 2. – article id. 127. – p.p. 33.
191. *Shaddad Muawia H., Jenniskens Peter, Numan Diyaa, Kudoda Ayman M., Elsir Saadia, Riyad Ihab F., Ali Awad Elkareem, Alameen Mohammed, Alameen Nada M., Eid Omer, Osman Ahmed T., Abubaker Mohamed I., Yousif Mohamed, Chesley Steven R., Chodas Paul W., Albers Jim, Edwards Wayne N., Brown Peter G., Kuiper Jacob, Friedrich Jon M.* The recovery of asteroid 2008 TC3. // *Meteoritics & Planetary Science.* – 2010. – V. 45. – Iss. 1557. – P. 1557 - 1589.
192. *Shestakova L.I., Chalabaev A., Demchenko B.I., Rspaev F.K.* The velocity of the dust near the Sun during the Solar Eclipse of March 29, 2006 and sungrazing comets. – arXiv:1003,2818, 2010.
193. *Shkuratov Yu. G., Starukhina L. V., Hoffmann H., and Arnold G.* A model of spectral albedo of particulate surfaces: implications for optical properties of the Moon. // *Icarus.* – 1999. – V. 137. – №. 2. – P. 235 - 246.
194. *Simon J.L., Bretagnon P., Chapront J., Chapront-Touzé M., Francon G., Laskar J.* Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets. // *Astron. Astrophys.* – 1994. – V. 282. – P. 663 - 683.
195. *SonotaCo* A meteor shower catalog based on video observations in 2007-2008. // *WGN, J. Int. Meteor Organiz.* – 2009. – V. 37. – №. 2. – P. 55 - 62.
196. *SonotaCo* Network Simultaneously Observed Meteor Data Sets SNM20xxx, <http://sonotaco.jp/doc/SNM/>
197. *Southworth R.B., Hawkins G.S.* Statistics of meteor streams. // *Smiths. Contr. Astrophys.* – 1963. – V. 7. – P. 261 - 285.
198. *Staubach Peter, Divine Neil, Grün Eberhard.* Temperatures of Zodiacal dust // *Planetary and Space Science.* – 1993. – V. 41. – Iss. 11 - 12. – P. 1099 - 1108.

199. *Stenbaek-Nielsen H, Jenniskens P.* A shocking Leonid meteor at 1000 frames/s // 34th COSPAR Sci. Assembly / The Second world space congress, 10-19 October, 2002. Houston, USA. – 2002. – P. 1650.
200. *Stevenson R., Bauer J.M., Kramer E. A., Grav T., Mainzer A.K., Masiero J.R.* Lingering Grains of Truth around Comet 17P/Holmes. // *Astrophysical J.* – 2014. – V. 787. – №. 2. – article id. 116. – 6 p.p..
201. *Suzuki S., Akebo T., Suzuki K, Yashida T.* Multi-station TV observations of the 2001 Leonids // *WGN. J. Meteor Organization.* – 2003. – V. 31. – №. 6. – P. 183 - 1888.
202. *Taff L.G.* Bi-telescopic, deep. Simultaneous meteor observations // *Proc. Int. Meeting / Asteroids, Comets, Meteors. II.* June 3-6, 186. Uppsala, Sweden. – 1986. – P. 603 - 608.
203. *Tokunaga A., Golish W., Griep D., Kaminski C., Hanner M.* The NASA infrared telescope facility comet Halley monitoring programme. // *Astron. J.*, 1988. – V. 96. – P. 1971 - 1976.
204. *Tosi F., Capria M.T., Capaccioni F., Filacchione G., De Sanctis M.C., Erard S., Leyrat C., Bockelée-Morvan D., Kuhrt E.* Comet 67P/C-G: Surface Temperatures as Derived by Rosetta/VIRTIS in the Mapping Phase. // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract.* 2014. – P41C-3953.
205. *Trigo-Rodríguez J.M., Llorca J.* On the sodium abundance in cometary meteoroids // 35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18 - 25 July 2004, in Paris, France. 2004. – P. 362.
206. *Trigo-Rodríguez J.M., Llorca J., Fabregat J.* Chemical abundances determined from meteor spectra - II. Evidence for enlarged sodium abundances in meteoroids // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2004. – V. 348. – Iss. 3. – P. 802 - 810.
207. *Ueda M., Fujiwara Y.* Television Meteor Radiant Mapping // *Earth, Moon, and Planets.* – 1995. – V. 68. – №. 1 - 3. – P. 585 - 603.

208. *Ueda M., Fujiwara Y., Sugimoto M., Kinoshita M.* Results of doublestation TV observations in 1998 and 1999 // Proc. Conf. Meteoroids 2001. 6-10 August 2001. Swedish Inst. for Space Physics, Kiruna, Sweden (ESA-SP 495). – 2001. – P. 325 - 330.
209. *Van de Hulst H.C.* Zodiacal Light in the Solar Corona. // *Astrophys. J.* – 1947. – V. 105. – P. 471 - 488.
210. *Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R.* Catalogue of representative meteor spectra. // *Astron. & Astroph.* – 2015. – V. 580. – id. A67. – 31 pp.
211. *Watanabe J., Kasuga T., Terai T., Miyazaki S., Ohta K., Murooka F., Ohnishi T., Yamasaki T., Mito H., Aoki T., Soyano T., Tarusawa K., Matsunaga N., Sako S., Kobayashi N., Doi M., Enomoto, T.* Faint meteor observation by large-format CMOS sensor with 1,05-m Kiso schmidt telescope. // *The Meteoroids 2013, Proceedings of the Astronomical Conference held at A.M. University, Poznań, Poland, Aug. 26-30, 2013, Eds.: T.J. Jopek, F.J.M. Rietmeijer, J. Watanabe, I.P. Williams, A.M. University Press.* – 2014. – P. 325 – 328.
212. *Wehry A., Krüger H., Grün E.* Analysis of Ulysses data: Radiation pressure effects on dust particles. // *Astron. and Astrophys.* – 2004. – V. 419. – P. 1169 - 1174.
213. *Wiegert Paul A.* The Dynamics of Low-Perihelion Meteoroid Streams. // *Earth, Moon, and Planets.* – 2008. – V. 102. – Iss. 1-4. – P. 15 - 26.
214. *Yoshida T.* The telescopic radiatn areas of some meteor streams // Proc. Int. Astron. Symp. Meteoroids and their parent bodies. July 6-12, 1992 / Eds Stohl J., Williams I.P. Bratislava: Astron. Inst., Slovak Acad. Sci. – 1993. – P. 205.
215. *Zhojil V., Hollan J., SimekM.* The relation between meteor optical brightness and properties of the ionized trail. III - Double station observations (Results of the Ondrejov Meteor Expeditions in 1972 and 1973). // *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia.* – 1985. – V. 36. – P. 44 - 56.

216. *Zhojil V., Hollan J., Hajduk A.* Concentration of small particles in Orionids // Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia. – 1987 – V. 38. – №. 6. – P. 372 - 375.
217. *Zimnikoval P.* TV observations of meteors from the Aquarius region in early August // Proc. Int. Meteor Conf. September 19-21, 2003. Bollmannsruh, Germany / Eds Triglav-Cekada M., Trayner C. Int. Meteor Organization. – 2003. – P. 180 - 183.
218. *Zuluaga J.I., Ferrin I.* A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. // (Unpublished Material, 2013), preprint at: <http://arxiv.org/abs/1302,5377>
219. *Zuluaga J.I., Ferrin I., Geens S.* The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage. // (Unpublished Material, 2013) eprint arXiv:1303,1796, <http://arxiv.org/abs/1303,1796>

ДОДАТОК

Таблиця А.

Погрішності деяких астрометричних і геометричних параметрів метеорів, зафіксованих у кореспондуючих пунктах Крижанівка (Одеса) та острів Зміїний (Одеська обл.).

№	Назва інструмента, (№ метеора в загальній базі даних)	Похибка у координатах полюса великого метеорного кола			Кутова довжина метеорного зображення <i>L</i>	Різниці в лінійній висоті метеора над земною поверхнею		Різниці в положенні підметерних точок по висотах і геодезичних координатах	
		$\pm\alpha$	$\pm\delta$	$\pm\Delta\rho$		$\Delta H(\max)$	$\Delta H(\min)$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$
		(')				(')	(м)	(м)	(")
1	КО140 Зміїний 2010, (0001)	3,225	3,095	4,47	87,902				
	КО140Па, (0326)	1,606	0,989	1,89	119,881	44,88	1,70	0,90	0,71
2	КО140 Зміїний 2010, (0006)	7,345	3,611	8,18	59,740				
	КО140Па, (0334)	1,640	0,799	1,82	148,303	83,16	56,76	0,14	0,01
	SchmidtII, (0195)	0,842	0,731	1,12	36,628	83,14	65,53	0,23	0,02
	КР35, (0555)	1,683	0,677	1,81	98,839	83,20	74,78	0,11	0,01
3	КО140 Зміїний 2010, (0026)	7,955	7,858	11,18	17,173				
	КР35, 0568	1,150	0,779	1,39	152,671	102,61	30,08	1,32	0,61
4	КО140 Зміїний 2010, (0044)	4,681	1,132	4,82	81,946				
	КР35, (0585)	0,657	0,540	0,85	104,925	119,86	103,26	0,04	0,04

Таблиця А. (продовження)

5	КО140 Змінний 2011, (0013)	4,637	2,031	5,06	114,339				
	КР35, (1051)	1,640	2,788	3,24	34,585	63,12	57,24	0,08	0,29
6	КО140 Змінний 2011, (0025)	1,699	0,592	1,80	126,666				
	SchmidtII, (0413)	0,167	1,185	1,20	48,277	34,35	24,64	0,27	0,51
	КО140Па, (0777)	0,635	1,214	1,37	121,891	34,38	23,10	0,32	0,60
	КР35, (1059)	1,703	6,559	6,78	18,380	34,14	24,76	0,22	0,40
7	КО140 Змінний 2011, (0030)	1,110	1,187	1,63	95,529				
	SchmidtII, (0418)	0,666	0,573	0,88	44,929	59,85	4,60	0,75	0,40
	КО140Па, (0780)	1,273	0,770	1,49	146,851	59,28	0,01	0,72	0,38
	КР35, (1064)	2,779	1,812	3,32	71,054	58,30	0,01	0,95	0,54
8	КО140 Змінний 2011, (0032)	2,677	2,465	3,64	66,525				
	КО140Па, (0781)	1,540	0,792	1,73	149,276	207,07	168,96	0,58	0,39
9	КО140 Змінний 2011, (0042)	0,651	0,934	1,14	174,253				
	КР35, (1078)	5,328	4,144	6,75	25,986	305,96	190,02	1,30	0,16
10	КО140 Змінний 2011, (0054)	4,212	1,429	4,45	83,326				
	КР35, (1087)	3,858	4,859	6,20	20,493	164,14	110,18	0,02	0,03

Таблиця В.

Спостережні параметри метеорів необхідні для розрахунку елементів геліоцентричної орбіти (на епоху J2000.0).

№	Дата (UT)	λ_0	V_∞ $\pm \Delta V$	Vh	α	δ	$\pm \Delta R$	α'	δ'	λ	β
	YYMMDD D, h:m:s	(°)	км/с	км/с	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)
1	20100808 23:29:42	136,305	59,52 $\pm 1,39$	40,05	41,43	56,31	2,05	41,79	56,48	77,96	64,23
2	20100811 20:34:47	139,067	43,10 $\pm 0,54$	41,91	126,29	59,13	0,20	126,86	57,56	347,14	36,89
3	20100813 21:24:03	141,021	66,29 $\pm 4,67$	46,65	49,63	58,70	0,34	50,39	58,72	82,13	60,85
4	20100819 00:46:02	145,961	35,73 $\pm 0,20$	41,61	315,52	54,22	0,08	313,43	53,72	264,92	48,32
5	20110810 21:27:03	137,912	68,06 $\pm 1,65$	41,36	20,72	20,19	1,17	20,99	19,97	190,46	16,86
6	20110818 22:36:12	145,639	40,76 $\pm 1,20$	12,36	68,05	21,13	0,13	69,43	20,09	107,23	-6,26
7	20110821 22:58:53	148,541	64,40 $\pm 2,68$	44,57	56,59	59,55	0,17	57,07	59,70	83,96	62,34
8	20110821 23:48:10	148,574	59,73 $\pm 0,41$	43,46	44,96	64,95	0,79	45,13	65,24	79,27	74,55
9	20110826 23:57:41	153,402	41,18 $\pm 1,17$	36,69	9,38	-10,68	0,21	8,98	-11,83	315,95	-15,59
10	20110829 23:20:51	156,275	29,50 $\pm 0,18$	38,68	323,67	43,85	2,59	321,61	43,31	277,50	35,08

Таблиця С.

Елементи геліоцентричної орбіти (на епоху J2000.0). **Per** – Персеїди; **Spo** – спорадичні; **Sungr** – Sungrazers; **MIC** – Machholz Interplanetary Complex.

№ n/n	q	q'	e	i	ω	Ω	Str
	a.e.	a.e.		(°)	(°)	(°)	
1	0,936 ±0,015	8,819 ±1,701	0,808 ±0,103	112,346 ±2,678	150,411 ±3,818	136,3054	Per
2	0,495 ±0,004	62,553 ±17,257	0,984 ±0,019	57,907 ±0,690	90,693 ±0,593	139,0673	Spo
3	0,949 ±0,015	inf	1,416 ±0,430	115,529 ±2,489	155,185 ±3,921	141,0205	Per
4	0,890 ±0,001	34,702 ±9,305	0,950 ±0,012	52,082 ±0,223	218,597 ±0,164	145,9613	Spo
5	0,647 ±0,033	23,263 ±7,468	0,946 ±0,094	159,102 ±2,011	253,563 ±5,655	137,9119	Spo
6	0,035 ±0,011	1,055 ±0,005	0,936 ±0,019	169,986 ±1,670	185,136 ±1,058	325,6389	Spo (Sungr)
7	0,964 ±0,007	inf	1,223 ±0,238	115,335 ±1,530	159,132 ±2,166	148,5411	Per
8	0,989 ±0,001	inf	1,122 ±0,038	104,492 ±0,895	169,785 ±0,846	148,5740	Spo
9	0,121 ±0,005	3,995 ±0,602	0,941 ±0,011	42,926 ±2,443	144,288 ±0,427	333,4016	Spo (MIC)
10	0,788 ±0,020	5,556 ±1,246	0,752 ±0,040	39,393 ±1,322	239,466 ±4,099	156,2750	Spo