

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Куліченко Микола Олександрович**



УДК 521.9+521.98

**КАТАЛОГ ЕЛЕМЕНТІВ ГЕЛІОЦЕНТРИЧНИХ ОРБІТ МЕТЕОРОЇДІВ  
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Шульга Олександр Васильович**  
НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія»  
директор

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Зазуляк Петро Михайлович**  
Національний університет «Львівська політехніка»  
професор кафедри картографії і геопросторового  
моделювання

кандидат фізико-математичних наук  
**Клецонок Валерій Володимирович**  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка  
старший науковий співробітник, завідувач відділу  
астрометрії і малих тіл Сонячної системи

Захист відбудеться 27 березня 2019 р. о 13:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради - К 26.062.13 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м.Київ, проспект Комарова, 1, корпус № 3, ауд. 3.506, кафедра аерокосмічної геодезії.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м.Київ, проспект Комарова, 1, корпус No 8.

Автореферат розісланий 25 лютого 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук, доцент



Л.С. Чубко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена створенню каталогу елементів орбіт метеороїдів, кінематичних та позиційних параметрів їх атмосферних траєкторій, отриманих за результатами оптичних спостережень з використанням способу накопичення зі зміщенням (СНЗ) для отримання кадрів з опорними зорями у поєднанні з алгоритмом детектування метеорів у режимі реального часу [23, 24, 25].

**Актуальність теми.** Метеор — світлове та інші явища, що його супроводжують (тепло, удар, іонізація), які виникають внаслідок вторгнення твердого тіла (що має назву метеороїда) в газову атмосферу планети на високій швидкості. Вивчення метеороїдів та явищ, що виникають внаслідок їх входження в атмосферу Землі, має значний науковий та практичний інтерес для отримання даних про походження та еволюцію Сонячної системи, вивчення фізики планетних атмосфер, а також для вирішення проблеми астероїдно-метеороїдної безпеки [29, 30].

За різними оцінками доплив космічних тіл в земну атмосферу складає від 3 до 1400 тонн на добу. Розходження оцінок на три порядки викликане недостатньою точністю визначення допливу речовини у різних діапазонах мас, особливо найменш вивченими є тіла в діапазоні  $10^{-9}$ – $10^{-5}$  кг, найменші тіла, що спостерігаються в атмосфері Землі оптичними та радіолокаційними засобами. Найбільший внесок у доплив роблять спорадичні метеори, відсоток потокових метеорів становить не більше ніж (2–3) % [30].

Визначальною характеристикою метеорного потоку є положення радіанта — області на небесній сфері, в якій перетинаються зворотні продовження метеорних траєкторій, що належать до одного потоку. Знання екваторіальних координат радіанта і геоцентричної швидкості метеора дозволяє розрахувати вектор руху, елементи орбіти метеороїда та ідентифікувати тіло, що утворило потік [27]. Аналіз розподілень елементів орбіт метеороїдів для різних діапазонів мас дозволяє уточнити знання про розподілення малих тіл в Сонячній системі і про ймовірність зіткнення потенційно небезпечних тіл із Землею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи пов'язані з науково-дослідними роботами, що проводилися в НДІ “МАО” Міністерства освіти і науки України:

- “Изучение динамики орбитального движения объектов околоземного космического пространства по результатам наблюдений наземными оптическими и радиотехническими средствами” („ФАВОР”), номер державної реєстрації 0111U000084, 2011– 2013 рр.

- “Визначення високоточних координат об’єктів природного походження, що максимально наблизились до Землі, із застосуванням оригінальних ПЗЗ-технологій” (“Метеороїд”), номер державної реєстрації 0110U000259, 2010– 2012 рр.
- Дослідження астероїдів, комет та метеорів для задач астероїдно-кометної безпеки оптичними та радіотехнічними засобами (“АсКом”). 2013—2015 рр., №0113U003109.
- Вивчення кінематичних характеристик малих тіл Сонячної системи за результатами наземних оптичних спостережень (“МОНІТОР”). 2016—2018 рр.

Автор брав участь у виконанні всіх вищезгаданих робіт.

**Мета і задачі дослідження.** Створення каталогу елементів орбіт метеорів, кінематичних та динамічних параметрів їх траєкторій, отриманих за результатами односторонніх та базисних оптичних ПЗЗ-спостережень з використанням СНЗ.

Поставлена мета розв’язувалась виконанням таких завдань:

1. Впровадження в практику оптичних спостережень метеорів комбінованого методу ПЗЗ спостережень.
2. Ведення односторонніх та базисних спостережень метеорів в автоматичному режимі.
3. Розробка методик та програмного забезпечення (ПЗ) для первинної обробки даних за даними односторонніх спостережень.
4. Розробка програмного забезпечення для обчислення радіантів, векторів руху та елементів орбіт за даними базисних спостережень.
5. Формування каталогу елементів геліоцентричних орбіт, позиційних, кінематичних та фотометричних параметрів метеорних явищ у форматі для відправки у світові бази даних.

*Об’єкт дослідження* – метеорні явища.

*Предмет дослідження* – екваторіальні координати метеорів та їх радіантів, кінематичні параметри метеорної траєкторії, елементи геліоцентричної орбіти (вектор руху) метеороїдів.

*Методи досліджень.* З використанням СНЗ створено мережу автоматичних оптичних метеорних телескопів (МТ), які розміщено на відстані 11.7 км один від одного. Цілодобово працюючі МТ мають неперервний доступ до мережі Інтернет, що забезпечує формування баз даних спостережень у режимі реального часу. Обробка метеорних спостережень з використанням модифікованих формул координатної редукції забезпечує розрахунок високоточних екваторіальних координат кожної точки зображення метеора. Для траєкторій, що одночасно спостерігались з обох пунктів за загальноприйнятими методиками обчислюються координати радіантів, кінематичні параметри та елементи орбіт індивідуальних метеорів, а також

відповідні похибки. Проводиться статистичний аналіз розподілень кінематичних і орбітальних параметрів, на основі якого проводиться зовнішнє порівняння отриманих результатів.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Створено каталог кінематичних параметрів атмосферних метеорних траєкторій та елементів геліоцентричних орбіт для 1055 метеороїдів за результатами телевізійних спостережень камерами з полем зору  $<10^\circ$  на базисній відстані  $<15$  км.

2. Вперше виявлено маломасивні метеороїди ( $<0.01$  г), що рухаються з геоцентричними швидкостями  $<50$  км/с, та мають орбіти з ексцентриситетами біля  $0.9$  та нахилами  $(50-70)^\circ$ .

3. Отримано понад 12 000 однопунктних реєстрацій метеорів за період 2011-2017 рр. Створено каталог положень кожної точки зображення метеороного явища та його інтегральної зоряної величини.

4. Вперше для спостереження метеорів в оптичному діапазоні був застосований метод ПЗЗ спостережень, який забезпечує одночасне отримання окремих зображень опорних зір та метеорів з цифрового відеопотоку, а також отримання зображень опорних зір для кожного спостережуваного об'єкту.

5. Впроваджено в практику спостережень метеорів програмне забезпечення для автоматичного детектування метеорів, розроблене в НДІ "МАО", яке за ефективністю не поступається світовим аналогам.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Каталог елементів геліоцентричних орбіт і кінематичних параметрів метеорних тіл може бути застосований для пошуку потенційно небезпечних астероїдів.

#### **Достовірність і обґрунтованість результатів.**

Достовірність та обґрунтованість результатів підтверджується використанням відпрацьованих методик підготовки та проведення спостережень та їхньої попередньої обробки, аналізом похибок, а також порівнянням з аналогічними результатами інших метеорних мереж, представленими у світових базах даних.

**Особистий внесок здобувача.** Всі представлені в дисертації результати, отримані особисто дисертантом або за його безпосередньою участю. Автор приймав участь у виконанні робіт, спостережень, аналізі та інтерпретації, приведених у дисертації результатів.

Безпосередньо особистий внесок автора в друкованих роботах: [1, 2, 3] – автором проведені спостереження, обробка результатів і оцінка точності, написані тексти статей; [4] – автор брав участь у проведенні спостережень і обговоренні результатів; [4, 5] – автором проведені спостереження, обробка й аналіз результатів, отримані каталоги параметрів метеорних траєкторій за результатами однопунктних і базисних спостережень; [6] – авторське

свідоцтво отримане автором самостійно; [7, 8, 10, 13, 15, 16] – автор приймав участь у отриманні та обговоренні результатів, а також в написанні текстів доповідей; [9, 11, 12, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22] – автором самостійно отримані результати й написані тексти повідомлень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 13 наукових та науково-практичних конференціях:

- Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», Дніпропетровськ, 2012 р.
- XXVIII Генеральна асамблея Міжнародного астрономічного союзу, Пекін, 2012 р.
- IV Міжнародний спеціалізований симпозиум «Космос и глобальная безопасность человечества», Євпаторія, 2012 р.
- Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», Україна, Біла Церква, 15-17 травня 2013 р.
- International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013.
- Міжнародна конференція «Навколоземна астрономія-2013», РФ, Краснодарський край, Кубанський державний університет, 7-11 жовтня 2013 р.
- Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 25-річчю польоту космічного корабля «БУРАН», Україна, Миколаїв, 20 жовтня 2013 р.
- САММАС-2014, Меморіальна міжнародна конференція, присвячена сторіччю із дня народження О.В.Добровольського і 110-річчю із дня смерті Ф.О.Бредіхіна, Вінниця, 29 вересня – 2 жовтня 2014 р.
- Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», Україна, Житомир, 20-22 травня 2015 р.
- International Conference. Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy. Mykolaiv, Ukraine, 26-29.09.2016.
- KOLOS 2016. Vyhorlat Observatory, Humenne, Slovakia. 01-03.12.2016.
- 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa, Ukraine, 13-20.08.2017.
- 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa, Ukraine, 12-18.08.2018.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 22 наукових праці, з яких 5 [1, 2, 4, 5, 6] у фахових наукових журналах, 1 у закордонному фаховому виданні [3], 1 авторське свідоцтво [8], 3 роботи у збірниках наукових праць та 13 тез доповідей [9–22] на науково-технічних та науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота

складається зі вступу, 4 розділів, висновків і додатка. Обсяг основної частини дисертації становить 113 сторінок. Дисертація містить 43 рисунки та 1 додаток. Список використаних джерел містить 138 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, проведено стислий огляд стану проблеми, визначено задачі дослідження, зв'язок із програмами і темами НДР НДІ "МАО", сформульовано мету роботи і визначено наукову новизну та практичну значущість роботи, визначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, дано інформацію про публікацію та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі проведено огляд сучасних методів спостереження метеорів із застосуванням телевізійної техніки. Оптичні системи, що використовуються для спостережень метеорів поділяються на три типи: відеосистеми з широким полем зору ( $>40^\circ$ ), проникна здатність (5–7)<sup>m</sup>; стандартні відеосистеми з полем зору  $10^\circ$ – $40^\circ$ , проникна здатність (7–9)<sup>m</sup>; телескопічні відеосистеми (поле зору  $<10^\circ$ , проникна здатність краща ніж 9<sup>m</sup>). Телескопічні системи як правило поєднуються електронно-оптичними перетворювачами (ЕОП, image intensifier), що забезпечують розширення поля зору та підвищення чутливості. Найбільш поширеними ПЗЗ-камерами, що успішно застосовуються без ЕОП, є Mintron 12V6-EX та Watek 902H2 Ultimate, що мають досить високу чутливість (0.0001 лк) та є відносно недорогими.

Для отримання і обробки цифрових зображень метеорів існує декілька пакетів програм. Найбільш поширеними є MetRec (розробник Sirko Molau, Германия), AstroRecord (M. de Lignie, Нідерланди), UFO Tool Suite (SonotaCo, Японія) та AutoCAMS/MeteorScan (P. Gural, USA). Попри відмінності ці програми використовують ряд загальних методів цифрової обробки зображень для вирішення наступних задач: 1) усунення шуму (методи просторового усереднення, віднімання середнього кадру, нормалізація); 2) виділення метеорної траєкторії (групування і встановлення порогу, просторова й часова кореляція).

Результати спостережень у вигляді елементів геліоцентричних орбіт метеороїдів розміщені у базах даних Міжнародного астрономічного союзу (Meteor Data Center, IAU MDC), Міжнародної метеорної організації (IMO Virtual Meteor Observatory, IMO Video Meteor Network, MeteorNews), а також на сайтах національних та міжнародних метеорних мереж. Єдиної бази даних, яка збирала б дані з усіх існуючих метеорних мереж в єдиному форматі, не існує. Також найменше представлені ( $<1\%$ ) метеорні тіла з масами  $<0.01$  г.

У другому розділі наведено опис методів і техніки телевізійних

спостережень метеорів в НДІ "МАО". В основу метеорного комплексу покладено статичний телескоп на легкому монтуванні, що забезпечує ручне наведення інструменту по азимуту та куту місця. Конструктивно один метеорний телескоп складається з об'єктива і ПЗЗ-камери, закріплених з двох сторін циліндричного тубуса. Тубус встановлений в металевому корпусі (капсулі) діаметром 98 мм, довжиною 300 мм. У передній частині корпусу на ущільнювачах встановлено прозоре скло, яке запобігає попаданню опадів і пилу всередину корпусу. Також у передній частині корпусу встановлено пластмасову бленду. В якості світлоприймача використовувалася камера Watec LCL902H2 (768×576, 8.6×8.3μ, чутливість 0.0001 лк). Об'єктиви, що були успішно застосовані для спостереження метеорів протягом періоду функціонування комплексу в режимі базисних спостережень мають наступні характеристики: Сапоп-85mm (D=47 мм, F=85 мм, поле зору 3.2°×4.2°); Ломо-0501 (D=50 мм, F=100 мм, поле зору 2.7°×3.6°). Електронно-оптичні підсилювачі не застосовувались. Камера працює у режимі черезстроквої розгортки (50 напівкадрів/с) для забезпечення більшого часового розділення траєкторії.



а)



б)

Рис. 1. Комплекс метеорних телескопів НДІ "МАО": а) головна станція на території НДІ "МАО"; б) станція на відстані 11.7 км від головної.

Низка оригінальних методів спостереження була розроблена в НДІ "МАО" для спостереження об'єктів, що мають високі видимі швидкості на нерухомих телескопах [23, 24]. Одним з них є отримання з неперервного цифрового відеопотоку окремими способами кадрів з зорями та рухомих об'єктом (метеорним явищем) для більш точного вимірювання координат. Кадри з зорями отримуються способом СНЗ [26]. Програмне забезпечення для автоматичного виявлення метеорів було розроблено в 2010 році на основі



досвіду обробки відеопотоку в режимі реального часу [25]. Алгоритм детектування працює таким чином:

- 1) усереднення яскравості пікселів в комірках  $8 \times 8$  пікселів;
- 2) розрахунок співвідношення сигнал/шум у кожній комірці з використанням яскравості тієї ж комірки в 25 кадрах до і після поточного кадру;
- 3) пошук ліній метеорної траєкторії серед комірок, які перевищують порогове значення співвідношення сигнал/шум (використовуючи метод найменших квадратів з відкиданням великих відхилень);
- 4) пошук об'єктів, які рівномірно рухаються вздовж виявленої лінії (використовуючи метод найменших квадратів з виключенням великих відхилень);
- 5) виключення об'єктів, швидкість яких становить менше 2 град/с (ідентифікуються як супутники);
- 6) збереження серії зображень.

Паралельно з процесом детектування в режимі реального часу сумуються кадри з зображеннями зір за 20–30 с, використовуючи техніку накопичення зі зміщенням. Середня квадратична похибка (СКП) опорної системи складає (6–10)". Проникна здатність для зірок (12–13)<sup>m</sup>.

Синхронізація спостережень забезпечується портативною службою часу на базі GPS-приймача Resolution-T, з якого на LPT-порт комп'ютера подається PPS-імпульс, що використовується для калібрування тактової частоти процесора. Таким чином точність синхронізації базисних станцій може досягати  $10^{-4}$  с.

Ефективність детектування метеорів визначається як відношення кількості явищ, розпізнаних як метеори, до загальної кількості зареєстрованих явищ, до яких відносяться шумові сплески в роботі камери, прольоти птахів, літаків та інших рухомих об'єктів, різка зміна яскравості фону під час грозових дощів. Таким чином ефективність залежить від сезону спостереження, а також від погодних умов. Середня ефективність реєстрації метеорів складає 40-50%.

Первинна обробка результатів спостереження складається з наступних етапів (з використанням відповідного ПЗ):

- 1) обробка кадрів з опорними зорями (2011-2012 рр. – Astrometrica 4.4.1.364, зоряний каталог – USNO-B1.0; 2012-2018 рр. – для більш ефективної автоматизації процесу обробки автором створений комплекс програм TraEx на мові програмування Python, каталог – Tucho2);
- 2) виділення точок метеорної траєкторії у системі координат кадру (штатна програма CCD у ручному режимі, розроблена автором програма TraEx – в напівавтоматичному);
- 3) отримання екваторіальних координат точок метеорної траєкторії

(2011-2012 рр. – штатна програма met, після 2012 р. – TraEx).

У **третьому розділі** проведено аналіз результатів спостережень, порівняння метеорних телескопів, визначено критерії якості спостережного матеріалу, викладена методика обчислення кінематичних та орбітальних параметрів метеороїдів.

У 2011-2016 рр. отримано більше 12000 метеорних реєстрацій, які після обробки склали каталог параметрів отриманих з однопунктних спостережень. До цих параметрів відносяться: часова тривалість метеора,  $s$ ; кутова довжина спостереженої траєкторії, кутова ширина спостереженої траєкторії, середня кутова швидкість метеора,  $град/с$ ; інтегральна зоряна величина метеора, та зоряна величина в максимумі кривої блиску; екваторіальні координати початку і кінця спостереженої траєкторії; екваторіальні координати полюсів великих кіл метеорної траєкторії (ПВКМТ), а також значення відповідних похибок.

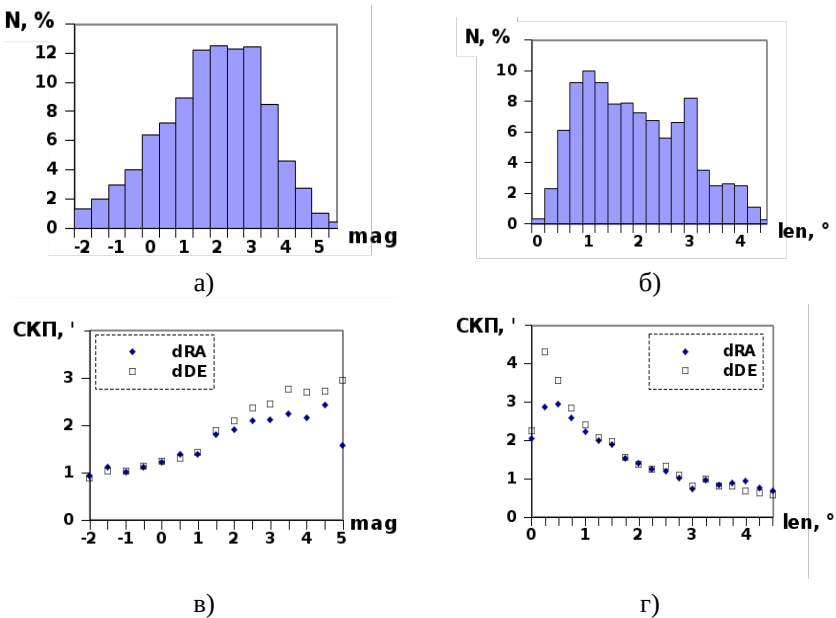


Рис. 2. Залежність похибок визначення координат ПВКМТ від інтегральної зоряної величини ( $mag$ ) (в) та кутової довжини траєкторії ( $len$ ) (г) співставлена з розподіленнями метеорів по інтегральній зоряній величині (а) та довжині (б).

Часова тривалість спостережених траєкторій знаходиться у границях 0.05–1.0 с. Кількість півкадрів, що містять траєкторію одного метеора

варіюється від 1 до 30 з максимумом 4-6 півкадрів. 86% траєкторій мають кількість кадрів  $>3$ , що дозволяє достовірно визначати кутову швидкість метеора. При подальшому визначенні висот метеорів та аналізі профілів кривих блиску важливо враховувати наявність в кадрі моментів появи та згасання метеора, тобто повноту метеорної траєкторії. Через малі поля зору телескопів лише 17% траєкторій є повними, для 53% траєкторій зареєстровані моменти або появи, або згасання, решта – фрагменти середин траєкторій метеорів.

Розподілення метеорів за інтегральною зоряною величиною та кутовою довжиною траєкторії показані на рис. 2, а, б і свідчать про переважну більшість метеорів середньої яскравості та коротких за довжиною. Прийнятою в світовій практиці мірою інструментальної зоряної величини метеора є величина в максимумі кривої блиску, що відповідає інтегральній зоряній величині найбільш яскравого фрагменту траєкторії, що отримується в одному півкадрі. Інструментальні зоряні величини метеорів знаходяться у діапазоні  $(-4-6)^m$  з максимумом у  $2^m$ , що свідчить про наявність досить слабких метеорів, порівняно з тими, що представлені у Віртуальній метеорній обсерваторії.

Середня квадратична похибка визначення координат ПВКМТ складає  $(0.02-0.05)^\circ$  (Рис. 2, в, г). СКП лінеаризації, яка розраховується за кутовими відстанями точок траєкторії від лінії великого кола, що їх апроксимує, складає  $(10-15)''$ . Залежність СКП визначення координат ПВКМТ демонструє збільшення похибки для інтегральних зоряних величин слабших ніж  $2^m$ . Також характерне експоненціальне збільшення СКП при зменшенні довжини траєкторії.

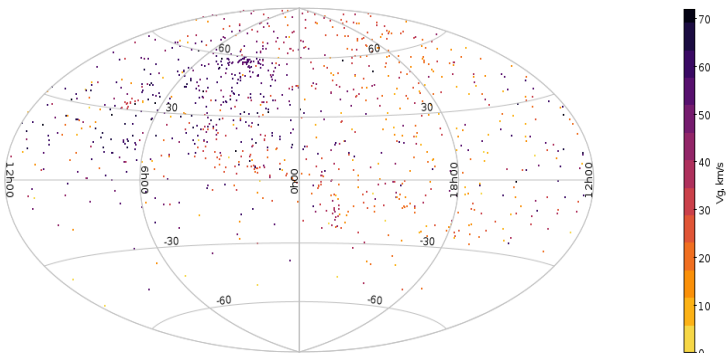


Рис. 3. Екваторіальні координати радіантів 2013-2016 рр.

В 2013-2016 рр. проводились базисні спостереження метеорів з величиною бази 11.7 км. За результатами спостережень обчислювались

екваторіальні координати радіантів, параметри атмосферної траєкторії, вектор руху та елементи геліоцентричної орбіти з відповідними похибками. Для оцінки похибок, а також для уточненого розрахунку параметрів траєкторії, було впроваджено метод Монте-Карло [32]. Даний метод заснований на генерації випадкових чисел у відповідності до статистичних розподілів виміряних екваторіальних координат метеора та, як наслідок, отримання відповідних розподілів для всіх шуканих кінематичних та орбітальних параметрів метеорного тіла. Такий підхід дозволяє оцінити середне-квадратичні відхилення шуканих величин, а також уточнити їх математичне очікування.

У четвертому розділі проведено статистичний аналіз розподілень кінематичних параметрів та елементів орбіт метеороїдів.

За результатами базисних спостережень в НДІ “МАО” отримано каталог елементів геліоцентричних орбіт для 1055 метеороїдів в діапазоні фотометричних мас  $10^{-7}$ – $10^{-2}$  кг (Рис. 4). Величина фотометричної маси метеороїда оцінювалась за наближеною моделлю запропонованою Кручиненко [29]:

$$m_0 = \frac{1.62 \cdot 10^5 \cdot 2.512^{-M}}{V_0^4 \cdot \cos(z_R)},$$

де  $M$  — абсолютна зоряна величина метеора,  $V_0$  — геоцентрична швидкість, км/с,  $z_R$  — зенітна відстань радіанта. Величина фотометричної маси відіграє в даному випадку роль статистичного параметра, за яким проводиться класифікація метеорних тіл.

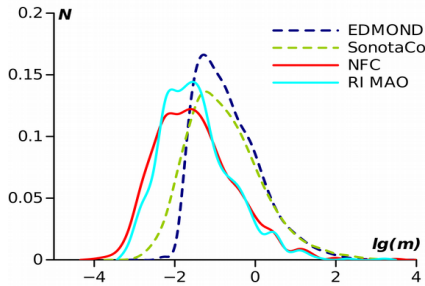


Рис. 4. Розподілення метеороїдів за фотометричними масами

Довжини спостережених метеорних шляхів знаходяться в діапазоні 1.2-15 км. Висоти точок метеорних шляхів в атмосфері розраховувалися відносно еліпсоїду WGS-84 і варіюються переважно в межах 60-120 км. Середня квадратична похибка обчислення екваторіальних координат

видимого радіанту менша  $0.5^\circ$  при довжині базиу 11.7 км. Похибка оцінювання геоцентричної швидкості в середньому складає 0.5 км/с. Максимум розподілення геліоцентричних радіантів (екліптичних координат радіантів) знаходиться поблизу площини екліптики. Також розподілення геліоцентричних радіантів має два типові максимуми: біля апексу та менший біля Antihelion source ( $180^\circ$  від Сонця) (Рис.5, г). З тими ж джерелами спорадичних метеорів пов'язані максимуми розподілення геоцентричних швидкостей: 15 км/с – Antihelion source, 50 км/с – апекс (Рис.5, а).

Розподілення елементів геліоцентричних орбіт метеороїдів показують, що більшість орбіт належать до навколоземної області з ексцентриситетами 0.5-0.8 і мають малі нахили до площини екліптики (Рис. 5, в, г). Локальний максимум в розподіленні елементів орбіт по нахилу біля  $110^\circ$  пов'язаний з метеорним потоком Персеїди.

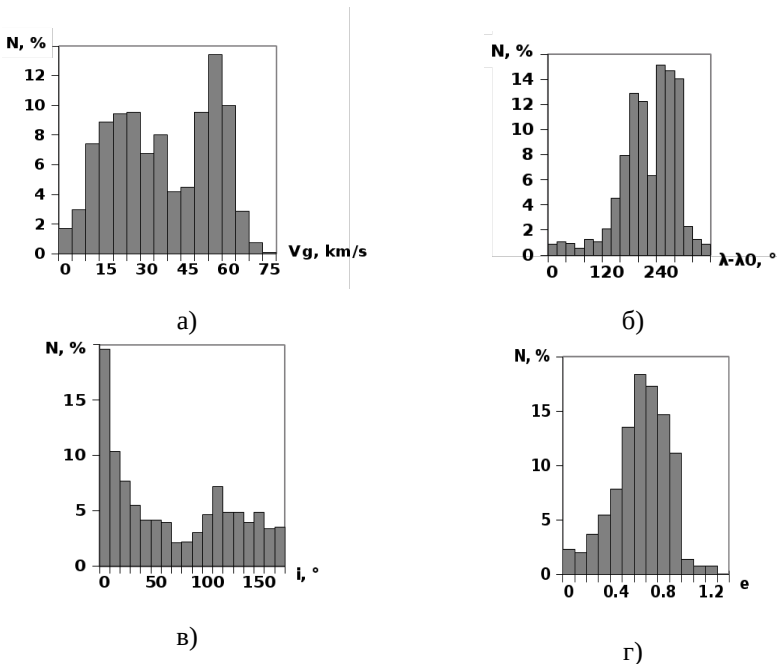


Рис. 5. Розподілення метеорів за: а) геоцентричною швидкістю; б) екліптичною довготою радіанта по відношенню до довготи Сонця; в) нахилом; г) ексцентриситетом

Також проведено порівняння з даними каталогів метеороїдних орбіт SonotaCo, EDMOND та NFC. Розрізняються два типи баз даних/каталогів: "малого поля" та "широкого поля" в залежності від того, який тип оптичної системи використовувався в спостереженнях. Для аналізу різних каталогів були відібрані лише спорадичні метеори. Порівняння спорадичних метеорних радіантів та елементів орбіт для різних баз даних показало, що спостереження "малого поля" мають наступні характерні ознаки:

1) більше відносне число маломасивних метеороїдів (близько 30%), порівняно з великими базами даних, отриманими з ширококутних спостережень (Рис.4);

2) істотне збільшення кількості метеорів з малою швидкістю ( $V_g < 20$  км/с) (Рис.6, а).

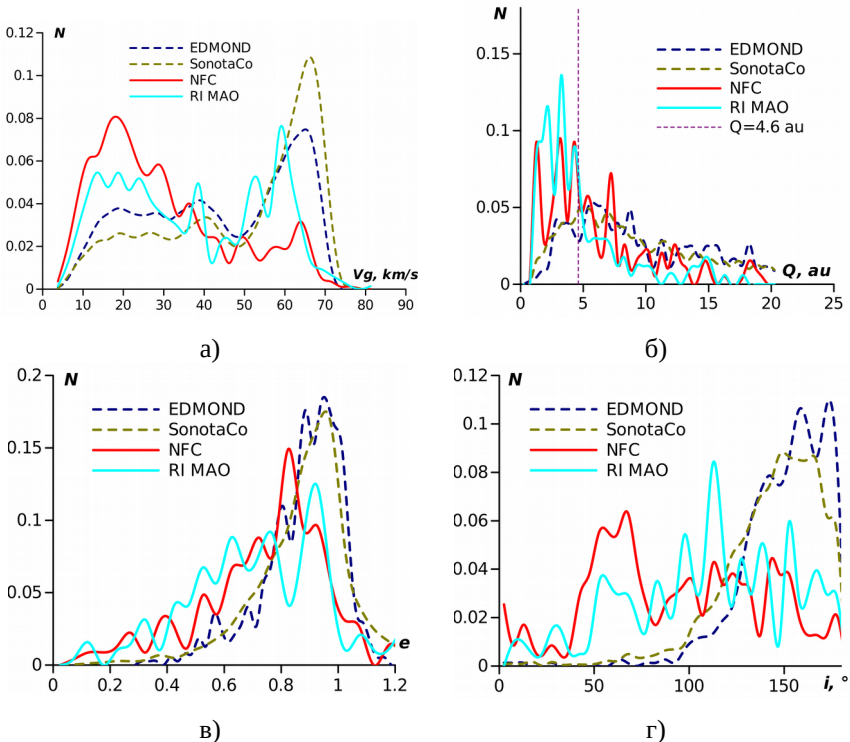


Рис.6. Розподілення кінематичних параметрів та елементів геліоцентричної орбіт метеороїдів спорадичного фону для різних каталогів: а) за геоцентричною швидкістю; б) за афелійною відстанню; в) за ексцентриситетом; г) за нахилом.

Метеороїди з  $m < 0.01$  г мають деякі характерні ознаки, що відрізняються також у випадках спостережень різними оптичними системами:

1) бази даних "малого поля" мають більше орбіт з  $e < 0.8$ , ніж дані "широкого поля" (Рис.6, в);

2) афелійні відстані в даних "малого поля" в основному менші за 4.6 а.о., але нахили таких орбіт більші за  $75^\circ$ , дані ширококутних спостережень мають лише ретроградні орбіти з афелійними відстанями, що переважно більші ніж 4.6 а.о. (Рис.6, б, г);

3) маломасивні метеороїди в "ширококутних" даних зумовлені лише радіантами апексної групи, помітна частина таких же метеороїдів за даними спостережень малими полями зору мають радіанти близькі до групи протисонячного джерела (Antihelion source).

В якості критерію розділення метеороїдних орбіт за походженням батьківських тіл (астероїди або комети) використано модифікований Q-критерій (або Q-і критерій) [31]. За цим критерієм орбіта метеороїда вважається орбітою астероїдного типу, якщо афелійна відстань  $Q < 4.6$  а.о. і нахил  $i < 75^\circ$ . Частка орбіт астероїдного типу для діапазону мас  $< 0.01$  г складає 2.5 %, а для загальної кількості спорадичних метеорів — 38%.

У **висновках** викладені найважливіші результати, отримані в дисертації.

У **додатку А** наведено каталог елементів геліоцентричних орбіт метеороїдів.

## ВИСНОВКИ

Метою дослідження було отримання каталогу геліоцентричних орбіт метеороїдів за результатами регулярних ПЗЗ-спостережень.

З 2011 ведуться регулярні спостереження метеорів із застосуванням комбінованого методу. У 2013-2016 рр. працювали 6 метеорних телескопів, розташованих на двох станціях на відстані 11.7 км.

Найбільш важливі результати:

1. Створено каталог кінематичних параметрів атмосферних метеорних траєкторій та елементів геліоцентричних орбіт для 1055 метеороїдів за результатами телевізійних спостережень камерами з полем зору  $< 10^\circ$  на базисній відстані  $< 15$  км. Похибка визначення швидкостей складає 0.5 км/с, висот — 50-100 м. 30% каталогу складають метеороїди з фотометричними масами  $< 0.01$  г.

2. Отримано масив даних, що містить більше 12000 однопунктних метеорних траєкторій. Створено каталог положень метеорних траєкторій та параметрів блиску. Середньо квадратична похибка апроксимації метеорної траєкторії великим колом — (10–15)".

3. Впроваджено в практику спостережень метеорів програмне забезпечення для автоматичного детектування метеорів, розроблене в НДІ "МАО", з використанням методу ПЗЗ-спостережень, що використовує накопичення зі зміщенням для отримання кадрів з опорними зорями.

4. Вперше виявлено маломасивні метеороїди ( $< 0.01$  г), що рухаються з геоцентричними швидкостями  $< 50$  км/с, та мають орбіти з ексцентриситетами біля  $0.9$  та нахилами  $(50-70)^\circ$ .

5. Вперше проведено порівняльний аналіз каталогу, отриманого в НДІ "МАО", з каталогами з відкритих джерел для діапазону мас метеорних тіл  $< 0.01$  г та проведена оцінка співвідношення тіл астероїдного та кометного типів для даного діапазону мас. Частка орбіт астероїдного типу становить  $38\%$  для всіх метеороїдів і  $2.5\%$  для метеороїдів з масами  $< 0.01$  г.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

### Публікації у наукових фахових виданнях

1. Куличенко Н.А. Использование ТВ-камер для наблюдений метеоров / Н.А. Куличенко, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Космична наука і технологія. – 2012. – Т. 18, № 6. – С. 67–72.
2. Куличенко Н.А. Телевизионные наблюдения метеоров в НИИ НАО / Н.А. Куличенко, А.В. Шульга, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова // Вестник Астрономической школы. – 2013. – Т. 9 №№ 1–2. – С. 107–110.
3. Kulichenko N. Double station observation of meteors in Nikolaev / N. Kulichenko, O. Shulga, Y. Kozyryev, Y. Sybiryakova // WGN. – 2015. – V. 43, No. 3. – P. 81–84.
4. Вовк В.С. Наблюдения АСЗ малых размеров и в условиях малой солнечной элонгации / В.С. Вовк, Н.А. Куличенко, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Кінематика та фізика небесних тіл. – 2015. – Т.31, №3. – С.73–80.
5. Сибирякова Е.С. Позиционные наблюдения комет комбинированным методом / Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга, В.С. Вовк, Н.А. Куличенко, Е.С. Козырев // Кінематика и физика небесных тел. – 2015. – Т.31, №6. – С. 47–54.
6. Kulichenko M.O. Double station observation of meteors with low baseline in Mykolaiv / M.O. Kulichenko, O.V. Shulga // Odessa Astronomical Publications. – 2017. – V. 30. – P. 230–231.



- Праці, що додатково відображають наукові результати дисертації**
7. Куличенко Н.А. Базисные наблюдения телескопических метеоров в Николаеве / Н.А. Куличенко, А.В. Шульга, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова // Наука і інновація. – 2017. – 13(1). – С. 83–88.
  8. Куличенко М.О. Автоматичне виділення та аналіз траєкторій метеорів ("TraEx"). / М.О. Куличенко // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 75259 від 07.12.2017.
  9. Shulga O. The current state and prospects for meteors observations in RI NAO / O. Shulga, Y. Kozuyev, Y. Sybiryakova, N. Kulichenko, V. Vovk // Abstract Book of IAU XXVIII General Assembly. – Beijing. – 2012.– P. 885–886.
  10. Kulichenko N. Video meteor observations at Nikolaev Astronomical Observatory-developed software and results / N. Kulichenko, O. Shulga, Y. Kozuyev, Y. Sybiryakova // Proceedings of the International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013. – 2014. – P. 50.
  11. Куличенко Н.А. Результаты наблюдений метеоров в оптическом диапазоне / Н.А. Куличенко // XIV міжнародна науково-практична конференція «Людина і Космос»: тези доповідей, 2012, Дніпропетровськ. – 2012. – С.149.
  12. Куличенко Н.А. Телевизионные наблюдения метеоров в НИИ НАО / Н.А. Куличенко, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», Україна, Біла Церква, 15–17 травня 2013 р.: Програма і тези доповідей, Київ – Біла Церква. – 2013. – С. 37–38.
  13. Куличенко Н.А. Средства и методы наблюдений метеоров применяемые в Николаевской астрономической обсерватории / Н.А. Куличенко, В.С. Вовк, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Сборник тезисов международной конференции «Околосемная астрономия – 2013». – Краснодар. – 2013. – С.106–107.
  14. Козырев Е.С. Применение комбинированного метода наблюдения для решения задачи астероидно-метеорной опасности / Е.С. Козырев, Н.А. Куличенко, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Статті і тези VI Міжнародної астрономічної конференції САММАС-2014 – Вінниця. – 2014. – С.71-72.
  15. Куличенко Н.А. Базисные наблюдения метеоров в НИИ Николаевская астрономическая обсерватория / Н.А. Куличенко, А.В. Шульга, Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених». Програма і тези доповідей. Київ — Житомир. – 2015. – С.49.

16. Shulga A. Optical observations of meteors in RI Nikolaev Astronomical Observatory / A. Shulga, Y. Sybiryakova, N. Kulichenko, V. Vovk // IAU General Assembly. Meeting #29. – 2015. – id.#2256807.
17. Shulga O. The current state and prospects for meteors observations in RI NAO / O. Shulga, N. Kulichenko, V. Vovk, Y. Kozyryev, Y. Sybiryakova // Highlights of Astronomy. – 2015. – V.16. – P. 183–183.
18. Kulichenko M. Double station observation of faint meteors in Nikolaev / M. Kulichenko, A. Shulga, Y. Sybiryakova // 41st COSPAR Scientific Assembly, abstracts from the meeting that was to be held 30 July - 7 August at the Istanbul Congress Center (ICC), Turkey, but was cancelled. – 2016. – Abstract B0.4-74-16.
19. Kulichenko M. Double station observation of faint meteors in Nikolaev / M. Kulichenko, O. Shulga, Y. Kozyryev, Y. Sybiryakova // Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy. International Conference. Abstract Book. – Mykolaiv. – 2016. – P. 18.
20. Kulichenko M. Observation of telescopic meteors in Nikolaev. / M. Kulichenko, O. Shulga, Y. Kozyryev, Y. Sybiryakova // International meeting on variable stars research (KOLOS 2016), Slovakia, 01-03.12.2016. Book of abstracts. – 2016. – P.7.
21. Kulichenko M.O. Double station observation of meteors with low baseline in Mykolaiv / M.O. Kulichenko, O.V. Shulga // Abstract book of 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Ukraine, Odessa. – 2017. – P.39.
22. Kulichenko M.O. Radiants and orbital data distribution of meteors observed in Mykolaiv / M.O. Kulichenko, O.V. Shulga // Abstract book of 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Ukraine, Odessa. – 2018. – P.47.

### **ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ**

23. Козырев Е.С. Исследование точности вычисления экваториальных координат при наблюдениях комбинированным методом / Е.С. Козырев, Е.С. Сибирякова, А.В. Шульга // Всероссийская Астрономическая Конференция. – Нижний Архыз. – 2010. – С. 17.
24. Абросимов В.М. Изучение объектов в ближнем космосе с помощью телескопа АЗТ-8, оснащенного ПЗС-камерой / В.М. Абросимов, А.Н. Ковальчук, С.В. Малевинский, и др. // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 79–84.
25. Козирев Є.С. Реєстрація метеорних явищ з використанням телевізійних камер (Meteor detect) / Є.С. Козирев // Свідectvo про реєстрацію авторського права на твір № 37593 від 25.03.2011.

26. Козирев Є.С. Спосіб спостереження низькоорбітальних супутників Землі і опорних зір / Є.С. Козирев // Патент на корисну модель №118001. Зареєстровано у державному реєстрі патентів України 10.07.2017.
27. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли / И.С. Астапович // М.: Физматгиз. – 1958. – 640 с.
28. Крамер Е.Н. Метеорная материя в атмосфере Земли и околосолнечном космическом пространстве / Е.Н. Крамер, И.С. Шестака // М.: Наука. – 1983. – 184 с.
29. Кручиненко В.Г. Математико-фізичний аналіз метеорного явища / В.Г. Кручиненко // К.: Наукова думка. – 2012. – 296 с.
30. Кручиненко В.Г. Метеорно-астероїдна небезпека та доплив космічної речовини на Землю / В.Г. Кручиненко, Ю.І. Волощук, Б.Л. Кашцев та ін. // Космічна наука і технологія. – 1999. – Т.5. №1. – С. 3-17.
31. Williams I.P. The Origin of stream and sporadic meteors, comets or asteroids / I.P. Williams, T.J. Jopek // Meteoroids 2013, Proceedings of the Astronomical Conference, held at A.M. University, Poznań, Poland, Aug. 26-30, 2013. – 2013. – P.179–192.
32. Козак П.М. Застосування статистичних методів при обробці телевізійних спостережень метеорів. / П.М. Козак // Вісник Астрономічної школи. – 2017. – Т.13 (1). – С. 22–27.

### АНОТАЦІЯ

**Куліченко М.О.** Каталог елементів геліоцентричних орбіт метеороїдів за результатами телевізійних спостережень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 астрометрія і небесна механіка – Національний авіаційний університет, Київ, 2018.

Дисертація присвячена створенню каталогу кінематичних параметрів та елементів геліоцентричних орбіт метеороїдів, що спостерігалися в атмосфері Землі як метеорні явища телескопами НДІ «МАО» в 2013-2016 рр. Спостереження проводились з двох пунктів за допомогою телевізійних ПЗЗ-камер із застосуванням способу накопичення кадрів зі зміщенням при спостереженні опорних зір. Ще однією особливістю спостережень є використання об'єктивів з фокусною відстанню більше 50 мм, що дозволило проводити спостереження на базисній відстані між пунктами спостережень 11.7 км та реєструвати метеорні тіла з масами < 0.01 г.

В результаті отримано каталог кінематичних параметрів атмосферних метеорних траєкторій та елементів геліоцентричних орбіт для 1055 метеороїдів. Для визначення похибок розрахунку елементів геліоцентричних орбіт

впроваджено метод Монте-Карло. Похибка визначення швидкостей складає 0.5 км/с, висот — 50-150 м.

Проведено порівняння отриманого каталогу з іншими відкритими базами даних, в тому числі й для діапазону мас метеорних тіл  $< 0.01$  г, та проведена оцінка співвідношення тіл астероїдного та кометного походження для даного діапазону мас. Частка орбіт астероїдного типу становить 38 % для всіх метеороїдів, що складають каталог, і 2.5% для метеороїдів з масами  $< 0.01$  г.

**Ключові слова:** метеорне явище, метеороїд, телевізійні спостереження, спосіб накопичення зі зміщенням.

### ABSTRACT

**Kulichenko M.O.** Catalog of meteoroid heliocentric orbits obtained from television observations. – Manuscript.

Thesis for a degree of the candidate in Physics and Mathematics sciences on specialty 01.03.01 – Astrometry and Celestial Mechanics. – National Aviation University, Kyiv, 2018.

The thesis refers to creation of kinematic parameters and heliocentric orbital elements catalog of meteoroids which observed in Earth atmosphere as meteors by RI “MAO” telescopes in 2013-2016. Double station observations were conducted by TV CCD-cameras using “track-and-stack” technique for obtaining of reference stars frames. One more feature of the observations is that lens with focal length  $> 50$  mm were used and it has gave the possibility of short baseline (11.7 km) using and detecting of meteoroids with masses  $< 0.01$  g.

As a result the catalog of kinematic parameters of atmospheric trajectories and heliocentric orbital elements for 1055 meteoroids was obtained. A Monte-Carlo method was implemented for estimation of heliocentric orbital elements accuracy. Accuracy of velocity calculation is about 0.5 km/s, accuracy of height calculation – (50-150) m.

A comparison of the obtained catalog with other open databases for the range of masses of meteor bodies  $< 0.01$  g was made and an estimation of the ratio of bodies of asteroid and comet origin for this range of masses was carried out. The share of orbits of the asteroid type is 38% for all meteoroids of the catalogs, and 2.5% for meteoroids with mass  $< 0.01$  g.

**Keywords:** meteor, meteoroid, heliocentric orbit, video observations of meteors, “track-and-stack” technique.