

УДК 523.68; 520.34; 520.37; 520.373; 521.31; 521.95
DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2025.72.10-16>

Павло КОЗАК, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-8357-8446
e-mail: kpm@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Олександр РОЖИЛО, провід. інж.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Юрій ТАРАНУХА, канд. фіз.-мат. наук, наук. співроб.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ОБЧИСЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕТЕОРІВ НА ПРИКЛАДІ КИЇВСЬКОГО АРХІВУ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОТОКУ ПЕРСЕЇДИ: ЕЛЕМЕНТИ ГЕЛІОЦЕНТРИЧНОЇ ОРБИТИ

Вступ. Досліджено методи та точність обчислень кінематичних характеристик метеорів, які отримують за базисних телевізійних (відео) спостережень. Точність опрацювання даних і розрахунків похибок обчислень продемонстровано на результатах спостережень метеорів потоку Персеїди 2010 р., проведених протягом однієї ночі. Ця робота є продовженням її першої частини, де описувалася ідея та практика використання методу Монте-Карло та наводилися елементи траєкторій згаданих метеорів. У цій другій частині запропоновано опис розроблення та реалізації відповідного програмного забезпечення, а також результати розрахунку елементів геліоцентричних орбіт тих самих метеорів.

Методи. Запропоновано короткий огляд схеми практичного використання методу Монте-Карло для опрацювання відеоспостережень метеорів. Загалом програмне забезпечення складається з двох базових компонент – власне процедури розрахунку всіх кінематичних параметрів метеора на кожному кроці генерації відповідних випадкових чисел (вхідних розподілів екваторіальних координат голови метеора), та візуалізації статистичних розподілів усіх кінематичних характеристик метеора протягом усього часу розрахунків, із завершальним виведенням даних у зовнішній файл.

Результати. Наведено результати обчислень радіантів та елементів геліоцентричних орбіт, їхніх стандартних відхилень для 11 метеорів з потоку Персеїди, які не публікувалися раніше. Особливу увагу приділено розрахунку великої півосі орбіти (та її похибки), який проводиться за її оберненим значенням, пропорційним енергії метеороїда. Зазначена величина є актуальною для пошуку метеороїдів із гіперболічними орбітами, що може бути свідченням їхнього походження з-поза меж Сонячної системи.

Висновки. Застосування методу Монте-Карло є оригінальним підходом для оцінювання середніх значень і дисперсій усіх кінематичних параметрів метеора. Відповідне програмне забезпечення візуально демонструє зміну (уточнення) статистичних розподілів кінематичних характеристик метеора протягом розрахунку, що дозволяє зупинити процес генерації випадкових чисел, та всього процесу, в будь-який момент. Продемонстровано розподіли величин похибок певних параметрів метеорів потоку Персеїди.

Ключові слова: метеор, базисні спостереження метеорів, відеоспостереження, статистичні методи оброблення даних, автоматизація процесу спостережень, елементи орбіт метеорів.

Вступ

У попередній частині роботи (Козак, Рожило, & Тарануха, 2025) робився наголос на необхідності повної автоматизації процесу оброблення відеоспостережень метеорів для їхньої швидкої каталогізації та представлення у вигляді бази даних. Важливим фактором в автоматичних розрахунках є коректне обчислення довірчих інтервалів кінематичних характеристик кожного метеора. Особлива необхідність знання похибок обчислень із заданою імовірністю виникає під час опрацювання так званих аномальних метеорів. В першу чергу це метеори з гіперболічними швидкостями, які можуть бути гостями Сонячної системи (Hawkes, & Woodworth, 1997) – для них важливо знати точність обчислення великих півосей орбіт, тобто знати, яка ймовірність того, що велика піввісь значуще може бути від'ємною (орбіта гіперболічна). Для метеорів із надвеликими висотами появи, які перевищують 135 км (Kozak, & Watanabe, 2020), або навіть 180–190 км (Spurný et al., 2000), важливо якомога точніше знати висоти їхньої появи в атмосфері, що очікувано може змінити фізичну модель метеора. Для встановлення факту реальності метеорів, дотичних до атмосфери, важливо знати довірчі інтервали для косинуса зенітного кута, який після перигею має перевищити 90° (Borovička, & Cepelcha, 1992; Kozak, & Watanabe, 2017). В той час, як у першій частині роботи (Козак, Рожило, & Тарануха, 2025) описано ідею застосування методу Монте-Карло для побудови статистичних розподілів параметрів метеора як випадкових величин (розподіли похибок), в цій статті ми наведемо програмну реалізацію вказаного методу з описом елементів візуалізації, а також розраховані за її допомогою геоцентричні радіанти і елементи геліоцентричних орбіт тих самих 11 метеорів з потоку Персеїд 2010 р., зареєстрованих протягом однієї ночі.

Методи

Під час програмної реалізації модуля обчислень кінематичних параметрів метеорів використано методи астрометричних редуцій (Kozak, Rozhilo, & Taranukha, 2001), які забезпечують масиви вхідних даних, обчислених за кожним із спостережних пунктів. Як вхідні параметри за кожним із пунктів розглядаються, в найпростішому випадку, розраховані екваторіальні координати голови метеора в усіх кадрах та їхні дисперсії, отримані після астрометричного оброблення із застосуванням регресивного аналізу, а також відповідні їм відносні показники часу – $(\bar{a}_i; \sigma_{a_i}; t_i)$,

$(\bar{\delta}_i; \sigma_{\delta_i}; t_i)$. Показники часу t_i для кожного i -го положення голови метеора для слабких високих метеорів не мають бути строго відповідні для обох пунктів покадрово – вважають, що на відносно короткій ділянці часу метеор рухається прямолінійно, і для опрацювання достатньо мати відносні значення моменту часу відносно нуля-пункту – часу

© Козак Павло, Рожило Олександр, Тарануха Юрій, 2025

синхронізації камери у спостережному пункті із світовим часом. Ці значення часу, які в відеосистемах визначаються частотою розгортки відеосистеми, зазвичай становлять 0.04 с для прогресивної розгортки (25 кадрів за секунду), або 0.02 с у черезрядковій розгортці (50 полів кадру за секунду), використовуються для розрахунку модуля швидкості метеора. За глобальний часовий репер, який впливає на точність визначення положення Землі на її орбіті під час реєстрації метеора, беруть нуль-пункт будь-якого пункту спостережень, який, зазвичай, відомий із точністю до секунди (ручна синхронізація). Додатково, для уточнення атмосферної траєкторії метеора та покращення точності обчислення його радіанта, можуть бути використані виміри з просумованих кадрів із динамічним метеором – кількість точок із відомими вхідними координатами зростає на порядок.

Далі процес обчислення всіх кінематичних параметрів метеора відбувається відповідно до методу, представленою в (Козак, 2002). Результати розрахунків, отримані без застосування методу Монте-Карло, автоматично проводять для кожного метеора для порівняння. Застосування методу Монте-Карло передбачає багатокрокову (до 10 000 разів у цій програмній реалізації) процедуру з отриманням значень параметрів метеора на кожному кроці. Причому вважаємо, що вхідні розподіли екваторіальних координат відповідають нормальним, тобто є гаусіанами (Kozak, Rozhilo, & Taranukha, 2001), крім випадків, коли йдеться про близькополюсну зону (Козак, Рожило, & Тарануха, 2025) – тоді розглянутий метод незастосовний – а відносні моменти часу відомі точно.

Зазначений програмний модуль був повністю інтегрований у програмний комплекс "Falling Star" (Kozak, 2008). Незалежно від цього, модуль є практично автономним і збирає необхідну інформацію для початку розрахунків із зовнішніх текстових файлів, де містяться всі необхідні дані. Такими даними, крім згаданих екваторіальних координат голови метеора, або координат ряду точок просумованого його зображення, та відносних моментів часу, є: дата та час спостереження метеора (останній – із точністю до секунди, інакше зображення метеора за різними пунктами не будуть вважатися такими, що належать до однієї космічної частинки); положення та швидкість Землі на її орбіті в геліоцентричній системі координат (беруть, зазвичай, із сайту <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>); та константи, такі як маса Землі та Сонця, фізичні сталі тощо.

Реалізація програмного модуля складається з двох базових та однієї додаткової компонент. Перша базова компонента – розрахунок кінематичних параметрів метеора на кожному кроці генерації випадкових значень вхідних статистичних розподілів і збереження їх у пам'яті комп'ютера до завершення розрахунків. Цей етап починається з формування вхідних даних випадкового характеру, відповідно до статистичного розподілу. Причому випадкові числа G_N для нормалізованого гаусового розподілу (розподіли прямого сходження та схилення положень голови метеора) розраховують за спрощеною формулою, відомою із статистики, яка дає досить гарні результати для діапазону $\pm 6\sigma$:

$$G_N = \sum_{i=1}^{12} \gamma_i - 6, \quad (1)$$

де γ – випадкові числа з прямокутного розподілу діапазону $0 \dots 1$ – беруть із генератора випадкових чисел комп'ютера. Друга базова компонента – візуалізація зміни поточної щільності статистичних розподілів усіх параметрів метеора. Візуалізація відбувається графічно, через вибрані опційно оператором N_{GEN} кроків генерації. Вона передбачає оновлення гістограм усіх розподілів, з можливістю бачити їхні поточні моменти й інші характеристики, які виводяться поряд із цією гістограмою. Дані розподілу які виводяться: середнє значення, стандартне відхилення, значення ймовірності в моді розподілу, ширина комірки гістограми – використовують стандартні для всіх параметрів графіки гістограми в межах $-100 \dots +100$ пікселів, тому розміри комірок варіюються. Додатковим параметром є кількість точок, які попадають в зону візуалізації, а вибрати її оператор може кратним поточному стандартному відхиленню кожного параметра, наприклад $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$ і т. д. (найоптимальніше, якщо не потрібна деталізація, вибирати $\pm 3\sigma$). Програму можна зупинити в будь-який момент за бажанням оператора за допомогою панелі керування (рис. 1а). Як зазначено вище, в цій версії кількість генерацій обмежена десятьма тисячами (відповідно до оперативної пам'яті комп'ютера), хоча варто зупинитися раніше, наприклад, коли 3-й знак в імовірності в межах, що візуалізуються, перестає змінюватись (для нормального розподілу будь-якої величини це становитиме 0.683 в межах $\pm 1\sigma$, 0.955 для діапазону $\pm 2\sigma$ та 0.997 для $\pm 3\sigma$). Остання, додаткова компонента програмного модуля, полягає в тому, щоб розрахувати середні значення та стандартні відхилення для кожного кінематичного параметра метеора для їх подальшої табуляції. Оскільки практично всі розподіли мають нормальний вигляд – цих двох параметрів достатньо. У випадку певної асиметрії у фінальному розподілі можна розрахувати інші – вищі моменти розподілів, та навести їх у фінальній таблиці, хоча простіше було б перерахувати довірчі інтервали для від'ємного і додатного стандартного відхилення. Для перевірки правильності генерації випадкових чисел також виводяться гістограми для γ , а також кілька вхідних розподілів – для прямого сходження і схилення першої і останньої точок на метеорах за обома пунктами – причому згенеровані точки розподілів повинні наближатися до заданих вхідних при $N_{GEN} \rightarrow \infty$. Для прикладу, на рис. 1 показано перевірені вхідні розподіли для схилення першої точки на метеорі, отримані зі спостережного пункту А для різних значень стандартного відхилення $\pm 1\sigma$ (рис. 1 – б, д), $\pm 2\sigma$ (рис. 1 – в, е), $\pm 3\sigma$ (рис. 1 – з, ж), а також різної кількості кроків генерації – $N_{GEN} = 400$ (рис. 1 – б, в, з) і $N_{GEN} = 2000$ (рис. 1 – д, е, ж). Суцільна крива відповідає теоретично побудованим розподілам, заданим вхідними даними. На 2000-му кроці генерації практично всі моменти розподілів – тобто середнє значення та стандартне відхилення – перестають змінюватись, тому процес можна зазвичай зупинити. Якщо потрібно перевірити, наскільки гладкими можуть бути розподіли, тобто який мінімальний розкид точок – генерацію варто продовжити до максимуму.

Зауважимо, що вигляд розподілів практично всіх параметрів добре відповідає нормальному типу, що очевидно є наслідком дії центральної граничної теореми, і пов'язано з великою кількістю ітерацій і параметрів, до яких вони застосовуються.

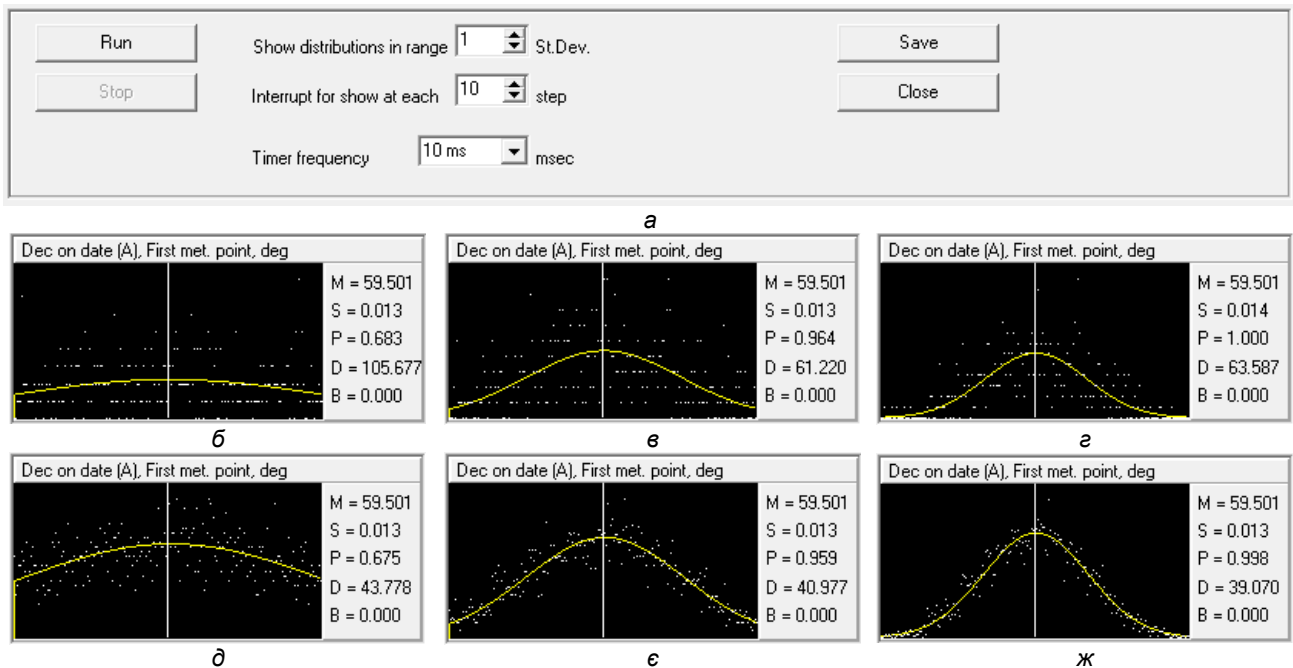


Рис. 1. Приклад відтворення схилення першої точки на метеорі для перевірки правильності генерації випадкових чисел: а – панель управління програмного модуля; верхній рядок гістограм (б, в, г) – 400 кроків генерації, нижній (д, е, ж) – для 2000 кроків; лівий стовпець (б, д), середній (в, е) та правий (г, ж) відповідають виведенню діапазонів у межах 1-го, 2-х та 3-х стандартних відхилень відповідно. Суцільні криві – вхідні теоретичні розподіли

Результати

Після закінчення процесу генерації, як зазначено вище, середні значення та дисперсії усіх параметрів метеора записуються у файл. За результатами візуального контролю розподілів параметрів деякі з них, вибрані довільно, можуть бути записані також у окремі файли для подальшого аналізу або демонстрації.

В табл. 1 наведено середні значення та стандартні відхилення екваторіальних координат геоцентричного радіанта (тобто без впливу гравітації Землі), а також модулів швидкості метеорів.

Таблиця 1

Середні значення та стандартні відхилення координат геоцентричного радіанта без гравітаційного впливу Землі метеорів потоку Персеїди 2010 р.

| № | Дата | UT | $\bar{\alpha}$ | σ_{α} | $\bar{\delta}$ | σ_{δ} | \bar{v} | σ_v |
|----------------------|-----------------|----------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------|------------|
| | місяць/день/рік | год:хв:с | [°] | [°] | [°] | [°] | км/с | км/с |
| 1 | 08/12/2010 | 20:22:00 | 54.79 | 0.08 | 81.25 | 0.87 | 42.14 | 0.06 |
| 2 | 08/12/2010 | 20:23:14 | 53.36 | 0.12 | 83.28 | 1.61 | 40.06 | 0.08 |
| 3 | 08/12/2010 | 20:27:48 | 27.19 | 0.12 | 86.07 | 2.25 | 41.70 | 0.07 |
| 4 | 08/12/2010 | 22:17:24 | 23.44 | 0.50 | 86.62 | 9.08 | 41.48 | 0.73 |
| 5 | 08/12/2010 | 22:33:43 | 79.64 | 0.30 | 84.60 | 5.59 | 40.74 | 0.07 |
| 6 | 08/12/2010 | 22:50:29 | 46.45 | 0.12 | 83.15 | 1.12 | 43.88 | 0.10 |
| 7 | 08/12/2010 | 23:33:06 | 293.56 | 0.27 | 87.68 | 10.63 | 42.04 | 0.12 |
| 8 | 08/12/2010 | 23:35:23 | 20.19 | 1.54 | 83.40 | 17.21 | 42.91 | 2.44 |
| 9 | 08/13/2010 | 01:02:32 | 18.14 | 0.37 | 85.42 | 2.70 | 42.04 | 0.55 |
| 10 | 08/13/2010 | 01:08:08 | 36.53 | 0.54 | 82.83 | 0.83 | 41.30 | 0.72 |
| 11 | 08/13/2010 | 01:12:42 | 47.53 | 0.35 | 82.33 | 0.95 | 42.32 | 0.52 |
| Усереднені значення: | | | 63.71 | 0.39 | 84.24 | 4.80 | 41.87 | 0.50 |

Останній рядок таблиці відповідає середнім значенням параметрів даного філаменту потоку Персеїди. Не зовсім зрозумілим залишаються кілька надзвичайно великих похибок схилення – порядку 10 градусів, а саме метеори № 4, № 7, № 8, чого не повинно було б бути. Можливим поясненням могла б слугувати близькість радіанта до полюса – рис. 2, однак тоді розкид значень прямого схилення мав би бути ще більшим, що не спостерігається. Як видно з рис. 2, розкид радіантів перебуває в межах близько 5° – 7° кутової дуги, і лише один із метеорів суттєво відхиляється від вибірки.

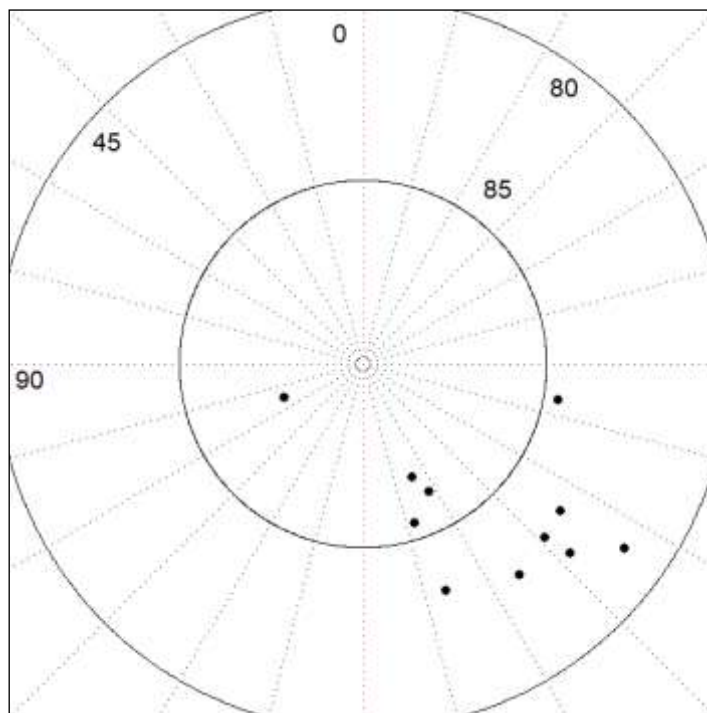


Рис. 2. Прямі сходження та схилення геоцентричних радіантів, скоригованих за гравітаційне притягання Землі для метеорів потоку Персеїди 2010

Зазначена ситуація із цими кількома метеорами заслуговує на детальніший аналіз. Найчутливішим фактором, який впливає на точність визначення координат радіанта є величина кута із заданої точки на метеорі між напрямком руху метеора (вектором швидкості) та напрямком на точку спостереження (або, що те саме, кутова відстань між радіантом метеора й оптичною віссю спостережної камери). Тим не менш, дані кути (позначимо їх для спостережних пунктів A та B як β_A та β_B) хоч і не були великими, але не критично малими: $\beta_A \approx 37.9^\circ$ і $\beta_B \approx 40.3^\circ$ для метеора № 4; $\beta_A \approx 29.3^\circ$ і $\beta_B \approx 29.5^\circ$ для метеора № 7; $\beta_A \approx 28.8^\circ$ і $\beta_B \approx 32.6^\circ$ для метеора № 8. Імовірно, винуватцем такої похибки є дуже малий розмір траєкторії цих метеорів, обумовлений малим часом їхнього існування і кількістю кадрів, придатних для оброблення, який разом із попереднім фактором і привів до таких значень. Часи існування та кількість відеокадрів, придатних для оброблення для згаданих метеорів, становила відповідно: $t_A \approx 0.141$ с, $N_A = 4$, $t_B \approx 0.342$ с, $N_B = 9$ для метеора № 4; $t_A \approx 0.223$ с, $N_A = 6$, $t_B \approx 0.342$ с, $N_B = 9$ для метеора № 7; $t_A \approx 0.182$ с, $N_A = 5$, $t_B \approx 0.262$ с, $N_B = 7$ для метеора № 8. Відповідні довжини траєкторій становили приблизно 6 км, 12 км і 10 км, в той час як у інших метеорів довжини їхніх траєкторій варіюють у межах 15–42 км, із середнім значенням 30 км.

Окремого розгляду заслуговує такий параметр, як велика піввісь орбіти метеора. Очевидно, що для метеорів з еліптичними орбітами (тобто тими, що явно належать Сонячній системі) велика піввісь набуває додатні значення. Однак для гіперболічних – справжніх, чи через похибки обчислень – її значення буде набувати від'ємні значення. У проміжному випадку – параболічній орбіті – значення великої півосі прямуватиме до нескінченності. Очевидно, що намагатися побудувати статистичний розподіл для цього параметра нереально, оскільки його просто не існує через розривність функції. Саме тому замість великої півосі a використовували її обернену величину $f_a = 1/a$, яка пропорційна кінетичній енергії метеороїда. Середні значення великої півосі $\bar{a} = 1/\bar{f}_a$ також відображено в табл. 2, але без значення дисперсії.

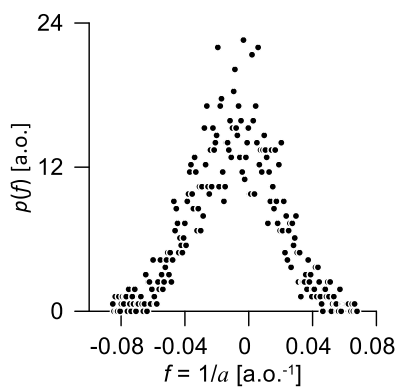
Елементи геліоцентричної орбіти метеорів наведено в табл. 2 (позначення для елементів орбіти – стандартні).

Кутові елементи в табл. 2 наведено на стандартну епоху J2000.0. Велика кількість значень великої півосі орбіти обумовлено, очевидно, близькістю геліоцентричної швидкості метеорів потоку Персеїди до гіперболічної межі близько 42 км/с. Взагалі відмітимо, що точність визначення швидкості метеора – найбільша проблема в обробленні метеорів, оскільки саме вона і призводить до великих похибок великої півосі орбіти. Значення похибки визначення швидкості більше 1 км/с при використанні камер із ширококутними об'єктивами – не рідкість. Далі вони ж приводять до збільшених похибок ексцентриситету, хоч і значно меншою мірою. Наприклад, в табл. 2 багато значень ексцентриситету, що більші за одиницю, відповідно до від'ємних великих півосей, хоч усереднене значення даного малого філаменту потоку Персеїди становить $\langle e \rangle = 0.996 \pm 0.036$, а загальноприйняте середнє значення ексцентриситету для метеорного потоку Персеїди є близько 0.97, тобто лежить у наведених вище межах. Тим не менш, якщо ми подивимося на густини розподілів, отриманих у результаті розрахунків за методом Монте-Карло, для обернених значень їхніх великих півосей із найменшими від'ємними значеннями (рис. 3), то побачимо, імовірність того, що орбіта все-таки еліптична – значна.

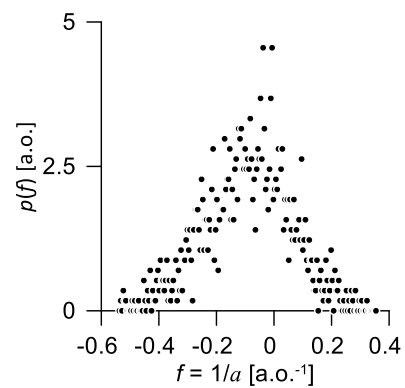
Таблиця 2

Середні значення та стандартні відхилення елементів геліоцентричних орбіт метеорів потоку Персеїди 2010 р.

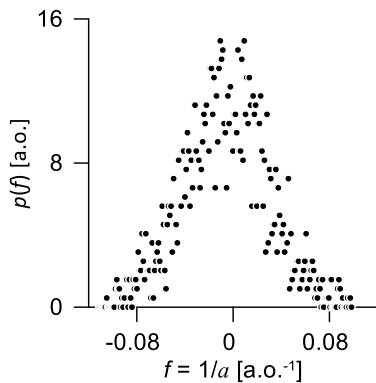
| № | Дата | UT | \bar{f}_a | σ_{f_a} | \bar{a} | e | σ_e | i | σ_i | Ω | σ_Ω | ω | σ_ω |
|----------------------|-----------------|----------|--------------------|--------------------|-----------|-------|------------|---------|------------|------------|-----------------|----------|-----------------|
| | місяць/день/рік | год:хв:с | а.о. ⁻¹ | а.о. ⁻¹ | а.о. | - | - | [°] | [°] | [°] | [°] | [°] | [°] |
| 1 | 08/12/2010 | 20:22:00 | -0.020 | 0.008 | -49.87 | 1.019 | 0.007 | 117.38 | 0.06 | 139.785359 | 0.000005 | 150.1 | 0.4 |
| 2 | 08/12/2010 | 20:23:14 | 0.174 | 0.010 | 5.76 | 0.838 | 0.009 | 115.27 | 0.08 | 139.786375 | 0.000007 | 147.2 | 0.6 |
| 3 | 08/12/2010 | 20:27:48 | 0.022 | 0.011 | 45.05 | 0.979 | 0.011 | 111.98 | 0.06 | 139.789744 | 0.000005 | 153.3 | 0.5 |
| 6 | 08/12/2010 | 22:17:24 | 0.043 | 0.047 | 23.44 | 0.959 | 0.044 | 111.38 | 0.47 | 139.863941 | 0.000036 | 153.0 | 2.1 |
| 7 | 08/12/2010 | 22:33:43 | 0.112 | 0.027 | 8.97 | 0.898 | 0.024 | 113.37 | 0.22 | 139.874828 | 0.000017 | 143.4 | 1.6 |
| 8 | 08/12/2010 | 22:50:29 | -0.189 | 0.012 | -5.30 | 1.180 | 0.011 | 115.37 | 0.08 | 139.886019 | 0.000007 | 154.1 | 0.4 |
| 9 | 08/12/2010 | 23:33:06 | -0.010 | 0.026 | -101.83 | 1.009 | 0.025 | 107.21 | 0.36 | 139.915447 | 0.000025 | 154.5 | 0.9 |
| 10 | 08/12/2010 | 23:35:23 | -0.093 | 0.149 | -10.73 | 1.091 | 0.146 | 114.04 | 2.03 | 139.916506 | 0.000152 | 158.4 | 4.5 |
| 16 | 08/13/2010 | 01:02:32 | -0.010 | 0.035 | -97.58 | 1.010 | 0.034 | 112.24 | 0.57 | 139.975515 | 0.000039 | 155.7 | 0.8 |
| 17 | 08/13/2010 | 01:08:08 | 0.059 | 0.050 | 16.89 | 0.943 | 0.048 | 115.44 | 0.71 | 139.979068 | 0.000050 | 153.7 | 1.1 |
| 18 | 08/13/2010 | 01:12:42 | -0.036 | 0.033 | -27.4 | 1.035 | 0.032 | 116.24 | 0.52 | 139.982099 | 0.000038 | 152.4 | 0.7 |
| Усереднені значення: | | | 0.005 | 0.037 | - | 0.996 | 0.036 | 113.628 | 0.47 | 139.886809 | 0.000035 | 152.4 | 1.2 |



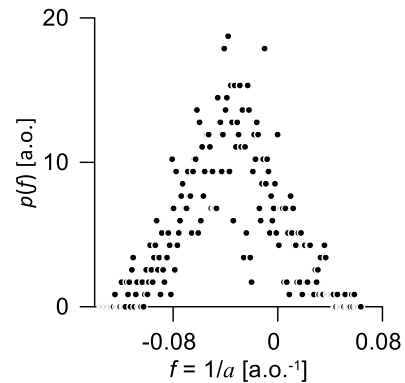
а



б



в



г

Рис. 3. Густина розподілів метеорів із потоку Персеїди, які після розрахунків демонструють від'ємні середні значення обернених великих півосей (гіперболічна форма орбіти)

Зазначимо, що у розподілах, зображених на рис. 3а та рис. 3в, імовірності того, що орбіти цих метеорів можуть бути еліптичними чи гіперболічними, практично однакові, а в метеора на рис. 3б імовірність еліпса складає близько 40 %. Розподіл на рис. 3г значно більше зсунутий у бік гіперболи, а ймовірність еліпса – близько 15 %. В жодному випадку середнє значення параметра не віддаляється від критичної межі більше ніж на 3σ .

Кутові елементи розраховують із значно вищою точністю. Похибка визначення нахилу орбіти становить $\sigma_i \approx 0.5^\circ$, а аргументу перигелію $\sigma_\omega \approx 0.7^\circ$. Висока точність обчислення довготи висхідного вузла обумовлена, очевидно, не точністю вимірювань, а високоточним знанням положення Землі на її орбіті.

Дискусія і висновки

Наведені в роботі результати кінематичного опрацювання метеорів потоку Персеїди, а саме екваторіальні координати та модулі швидкості радіанта скориговано за гравітаційний вплив Землі, та елементи геліоцентричних орбіт метеорів демонструють як позитивні, так і негативні сторони точності обчислень відеоспостережень. Найбільшою проблемою, як завжди, залишається точність обчислення швидкості, яка далі визначає точність розрахунку великої піввісі орбіти й ексцентриситету. Низька точність зазначених параметрів обумовлена, в першу чергу, низькою роздільною здатністю спостережних відеосистем, які оснащені ширококутними фотографічними об'єктивами, та низькою роздільною здатністю самих відеокамер – 640×480 пікселів. Кутові елементи орбіти розраховуються значно точніше. Використання для розрахунку кінематичних параметрів метеорів за допомогою методу Монте-Карло демонструє його високу ефективність. Розглядаючи безпосередньо густини розподілів, наприклад, обернених значень великих півосей орбіти з від'ємними значеннями (тобто по суті гіперболічні орбіти, якщо користуватися розрахованими середніми значеннями), можна побачити, що у більшості випадків імовірність гіпербол зовсім незначно перевищує імовірність того, що орбіта еліптична, що врешті, з урахуванням куткових параметрів, дає змогу прийняти правильне рішення щодо класифікації метеора.

Внесок авторів: Павло Козак – ідея наукової розробки – забезпечення та наповнення змістом статті – опис характеристик спостережної апаратури з використанням досвіду попередніх метеорних спостережень, участь у базисних телевізійних спостереженнях метеорів потоку Персеїди 2010 р., оброблення спостережних даних; Олександр Рожило – підтримка спостережних камер, спостереження, перегляд спостережних даних на аналогових носіях та їх оцифрування; Юрій Тарануха – підтримка спостережних камер, спостереження.

Джерела фінансування. Роботу виконано за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України в межах виконання держбюджетної теми № 25БФ023-01 Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Список використаних джерел

- Голубаєв, О. В., Горбаньов, Ю. М., Шульга, О. В., Андреев, О. А., Бушуєв, Ф. І., Відьмаченко, А. П., Грудинін, Б. О., Жилиєв, Б. Є., Калюжний, М. П., Козак, П. М., Куліченко, М. О., Малиновський, Є. В., Мозгова, А. М., Савчук, С. Г., Стеклов, О. Ф., Сумарук, Ю. П., & Янків-Вітковська, Л. М. (2022). Створення Української Метеорної Спостережної Мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості. *Космічна наука і технологія*, 28(4), 39–70. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.039>
- Козак, П. Н. (2002). Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров. *Кинематика и физика небесных тел*, 18(5), 471–480. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/149823>
- Козак, П. М., Рожило, О. О., & Тарануха, Ю. Г. (2025). Обчислення кінематичних параметрів метеора на прикладі київського архіву відеоспостережень потоку Персеїди: Елементи геліоцентричної орбіти. *Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Астрономія*, 71(1), 40–44. <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2025.71.39-43>
- Borovička, J., & Ceplecha, Z. (1992). Earth-grazing fireball of October 13, 1990. *Astronomy & Astrophysics*, 257, 323–328. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992A&A...257..323B>
- Hawkes, R. L., & Woodworth, S. C. (1997). Optical detection of two meteoroids from interstellar space. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 91, 218–219. <https://adsabs.harvard.edu/full/1997JRASC...91..218H>
- Kozak, P. M., & Rozhilo, A. A., & Taranukha, Y. G. (2001). Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors. *Proc. Meteoroids 2001 Conf.*, 6-10 August 2001 (ESA SP-495, November 2001) (pp. 337–342). Swedish institute of space physics, Kiruna, Sweden. <https://adsabs.harvard.edu/full/2001ESASP.495..337K>
- Kozak, P. (2008). "Falling Star": software for processing of double-station TV meteor observations. *Earth, Moon, and Planets*, 102, 1-4, 277–283. <https://doi.org/10.1007/s11038-007-9223-x>
- Kozak, P. M., & Watanabe, J. (2017). Upward-moving low-light meteor – I. Observation results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(1), 793–801. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx008>
- Kozak, P. M., & Watanabe, J. (2020). Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(4), 5550–5559. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2183>
- Spurný, P., Betlem, H., Jobse, K., Koten, P., & Leven, J. V. (2000). New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km. *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 1109–1115. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01497.x>

References

- Golubaev, A. V., Gorbanev, Yu. M., Shulga, O. V., Andreev, M. A., Bushuev, F. I., Vidmachenko, A. P., Hrudynin, B. O., Zhilyaev, B. E., Kaliuzhnyi, M. P., Kozak, P. M., Kulichenko, M. O., Malynovskyi, Ye. V., Mozgova, A. O., Savchuk, S. G., Steklov, A. F., Sumaruk, Yu. P., & Yankiv-Vitkovska, L. M. (2022). Creation of the Ukrainian meteor observation network: instruments, methods for processing, observatin possibilities. *Space Science and Technology*, 28(4), 39–70 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.039>
- Borovička J., & Ceplecha Z. (1992). Earth-grazing fireball of October 13, 1990. *Astronomy & Astrophysics*, 257, 323–328. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992A&A...257..323B>
- Hawkes R. L., & Woodworth S. C. (1997). Optical detection of two meteoroids from interstellar space. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 91, 218-219. <https://adsabs.harvard.edu/full/1997JRASC...91..218H>
- Kozak P. M., Rozhilo A. A., & Taranukha Y. G. (2001). Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors. *Proc. Meteoroids 2001 Conf.*, Swedish institute of space physics, Kiruna, Sweden, 6-10 August 2001 (ESA SP-495, November 2001), 337–342 [in Ukrainian]. <https://adsabs.harvard.edu/full/2001ESASP.495..337K>
- Kozak P. N. (2002). Analysis of methods and precision of equatorial coordinates determination at digital processing of TV observations of meteors. *Kinematics and physics of celestial bodies*, 18(5), 471–480 [in Russian]. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/149823>
- Kozak P. (2008). "Falling Star": software for processing of double-station TV meteor observations. *Earth, Moon, and Planets*, 102, 1-4, 277–283. <https://doi.org/10.1007/s11038-007-9223-x>
- Kozak P. M., & Watanabe J. (2017). Upward-moving low-light meteor – I. Observation results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(1), 793–801. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx008>
- Kozak P. M., & Watanabe J. (2020). Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(4), 5550–5559. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2183>
- Kozak P. M., Rozhilo O. O., & Taranukha Y. G. (2025). Calculation of kinematic parameters pf meteors basing on an example of the Kyiv video archive of Perseids shower. II. Heliocentric orbit elements. *Bulletin of Taras Shevchenko National university of Kyiv. Astronomy*, 71(1), 40–44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2025.71.39-43>
- Spurný P., Betlem H., Jobse K., Koten P., & Leven J. V. (2000). New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km. *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 1109–1115. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01497.x>

Отримано редакцією журналу / Received: 26.07.25
Прорецензовано / Revised: 12.09.25
Схвалено до друку / Accepted: 11.11.25

Pavlo KOZAK, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-8357-8446
email: kpm@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Olexander ROZHILKO, Leading Engineer
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Yuriy TARANUKHA, PhD (Phys. & Math.), Researcher
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

OBSERVATION AND CALCULATION OF KINEMATIC PARAMETERS OF METEORS BASING ON AN EXAMPLE OF THE KYIV VIDEO ARCHIVE OF PERSEIDS SHOWER: ELEMENTS OF THE HELIOCENTRIC ORBIT

Background. *The article is dedicated to the methods and accuracy of calculating the kinematic characteristics of meteors obtained from baseline television (video) observations. The accuracy of data processing and the calculation of computation errors are demonstrated using the results of observations of Perseid meteors in 2010, conducted over one night. This work is a continuation of the first part, which described the idea and practice of using the Monte Carlo method, and presented the trajectory elements of the mentioned meteors. Now, a description of the development and implementation of the corresponding software, and the results of calculating the heliocentric orbit elements of the same meteors, are proposed.*

Methods. *A brief overview of the practical application scheme of the Monte Carlo method for processing video observations of meteors is proposed. In general, the software consists of two basic components – the actual procedure for calculating all kinematic parameters of a meteor at each step of generating the corresponding random numbers (input distributions of the equatorial coordinates of the meteor's head), and the visualization of statistical distributions of all kinematic characteristics of the meteor during calculations, with the final output of data to an external file.*

Results. *The results of calculating radiant and heliocentric orbit elements, and their standard deviations for 11 Perseid meteors, which have not been published before, are presented. Special attention is paid to the calculation of the orbit's semi-major axis (and its error), which is performed using its inverse value, proportional to the meteoroid's energy. This value is relevant for searching for meteoroids with hyperbolic orbits, which may indicate their origin from outside the Solar System.*

Conclusions. *The application of the Monte Carlo method is an original approach for estimating the mean values and variances of all kinematic parameters of a meteor. The corresponding software visually demonstrates the change (refinement) of the statistical distributions of the meteor's kinematic characteristics during the calculation, which allows stopping the random number generation process, and the entire process, at any moment. The distributions of error values for certain parameters of Perseid meteors are demonstrated.*

Keywords: *meteor, meteor double-station observations, video-observations, statistical methods of data processing, automation of observation process, meteor orbital elements.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.