

ПОКРИТТЯ ЗОРІ АСТЕРОЇДОМ (853) НАНСЕНІЯ 8 КВІТНЯ 2021 р.

Представлено результати спостережень покриття зорі UCAC4 516-047388 астероїдом (853) Нансенія 8 квітня 2021 р. на спостережній станції у с. Крижанівка Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. Цей пункт використовуватиметься у створюваній мережі спостерігачів покрить. Для спостережень застосовано телескоп системи Шмідта ($D = 271,25$ мм, $F = 440$ мм) і камеру "ВІДЕОКАН-415-2001". Зоря UCAC4 516-047388 має низьку яскравість $14,2^m$, тому використовувалася довга експозиція тривалістю 5 с. Це перевищує максимальну тривалість покриття у 2,8 с. Для інтерпретації фотометричної кривої використано підхід, який дозволяє дійти висновку, що покриття відбулося, а також оцінити тривалість події. Розрахунки дають значення тривалості покриття $t = 2,0 \pm 1,2$ с, що в межах похибки збігається з очікуваним значенням. Наведено також опис спеціальної програми для оброблення спостережень покрить у вигляді послідовності графічних файлів, яка була використана для покриття астероїдом (853) Нансенія. Цю програму також можна використовувати для оброблення спостережень аматорів, які долучатимуться до спостережень покрить.

Ключові слова: астероїди, покриття зір, фотометрія.

Вступ. Спостереження покрить зір астероїдами дають корисну інформацію про форму та розміри астероїдів. Особливо цінними у такому разі є спостереження з кількох пунктів. Для цього з 2020 р. за ініціативи Головної астрономічної обсерваторії НАН України та Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка створено українську мережу пунктів для спостереження покрить. Розміри астероїдів варіюють у широких межах, та найбільша кількість невеликих астероїдів. За малих розмірів астероїдів смуга покриття матиме малу ширину. У такому випадку не можна використати всю мережу. Крім того не завжди є можливість спостерігати на телескопі з необхідними діаметрами і світлосилою та зі спеціальними швидкісними камерами. У першу чергу це стосується астероїдів із малими діаметрами, смуга покриття може проходити далеко від стаціонарних телескопів. У такому випадку використовують аматорські телескопи, або мобільні комплекси. Діаметр таких телескопів не дозволяє отримати спостереження покрить слабких зір із короткими експозиціями. Але будь-які спостереження корисні, оскільки вони можуть допомогти визначити межі діаметра астероїда прямим способом, який характерний для методу фотометрії покрить.

Спостереження. Покриття зорі UCAC4 516-047388 астероїдом (853) Нансенія відбулося 8 квітня 2021 р. Висота зорі над горизонтом складала 33° . Ефемериди передбачає максимальну фазу покриття в 20:47:26 UTC з похибкою ± 2 с і максимальну тривалість покриття 2,8 с. Яскравість астероїда під час покриття $15,9^m$, а візуальне падіння блиску дорівнює $1,91^m$.

На рис. 1 показано карту руху тіні астероїда на поверхні Землі. Географічне положення смуги покриття свідчить, що найсприятливішими для спостережень були південні райони України. Спостереження проводили на спостережній станції у с. Крижанівка (міжнародний код A85) на телескопі системи Шмідта ($D = 271,25$ мм, $F = 440$ мм). Для запису спостережень використовували камеру "ВІДЕОКАН-415-2001". У цієї камери як світлочутливий елемент використано ПЗЗ чип ICX415AL (<https://datasheetspdf.com/pdf-file/571962/SonyCorporation/ICX415AL/1>), який має 780×582 пікселів розміром $8,3 \times 8,3$ мкм. Спектральна чутливість камери приблизно відповідає візуальній смузі. Час кадру визначався за системним часом комп'ютера. Для контролю системного часу комп'ютера використано GPS-приймач зі спеціалізованою програмою, яка працювала у фоновому режимі [3, 4]. Експозиція для запису покриття вибиралася рівною 5 с, щоб отримати з одного боку зображення зорі, достатнє для фотометрування, і з другого боку максимально зменшити тривалість експозиції для кращої часової роздільної здатності.

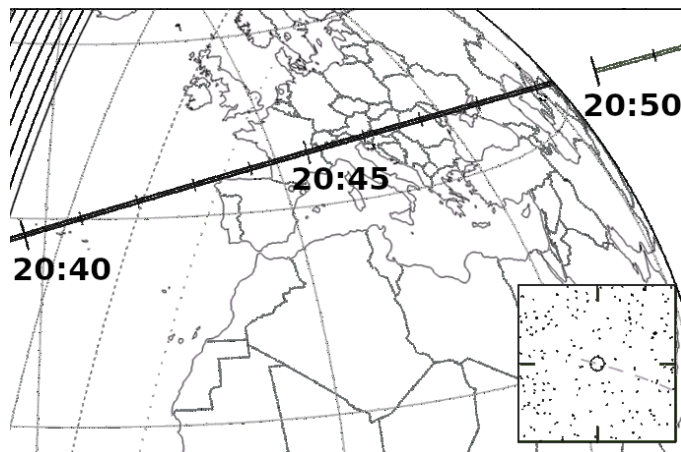


Рис. 1. Карта положення смуги покриття зорі UCAC4 516-047388 астероїдом (853) Нансенія, яке відбулося 8 квітня 2021 р.

Астероїд (853) Нансенія належить до астероїдів головного поясу. Астероїд відкрито в Сімеїзській обсерваторії 1916 р. За даними [2] має візуальне альbedo $p_V = 0,051$ і діаметр $D = 26,95$ км. Останні космічні виміри в межах проєкту WISE [6] дають майже таке саме значення альbedo $p_V = 0,051$ і дещо більше значення діаметра $D = 27,59$ км [5]. Спектральні спостереження показують, що за спектральною класифікацією SMASSII астероїд має тип Ch [1]. Цей тип характеризується плоским спектральним розподілом альbedo із широкою і неглибокою смугою поглинання, яка центрована на довжину хвилі близько 0,7 мкм. Типовий представник цього класу поверхонь – астероїд 19 Фортуна має темну поверхню зі слідами космічної ерозії, яка багата на прості органічні речовини, зокрема толіни. Зоря UCAC4 516-047388 за даними каталогу [7] має зоряну величину $m_V = 14,2^m$ і $m_R = 14,0^m$.

На рис. 2 показано фрагмент кадру, який отримано під час спостережень покриття на телескопі Шмідта ст. Крижанівка. Зорю, що покривалася, позначено кружком.

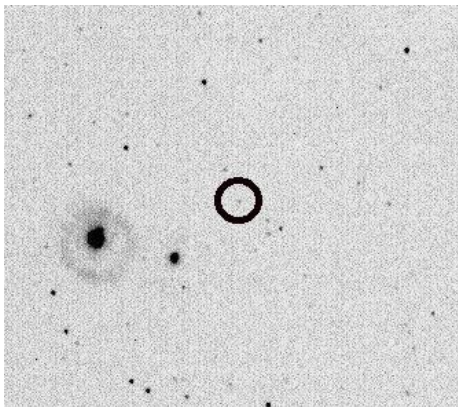


Рис. 2. Фрагмент кадру (негативне зображення) з позначеною зорею UCAC4 516-047388. Астероїд має низьку яскравість і тому не помітний у кадрі

Оброблення спостережень. У процесі спостережень отримується послідовність кадрів у tiff-форматі, яка передає палітру у вигляді відтінків сірого кольору з максимальною розрядністю 16 біт. Камера відображає меншу кількість розрядів – 12 біт, які займають старші біти у значенні інтенсивності пікселя в кадрі. У назві кожного файлу записується час закінчення експозиції. Для оброблення такої послідовності зображень написано спеціальну програму, яка дозволяє в напівавтоматичному режимі обробити спостереження покриття. Для оброблення вибирають перший кадр із послідовності зображень. За наявності темного кадру і кадру плоского поля вони враховуються у розрахунках інтенсивностей пікселів. Далі вибирають зорю, яка покривається, відмічаючи приблизне місце в кадрі за допомогою мишки. Програма обробляє зображення в районі, який відмічений мишкою. Спочатку визначають піксель із максимальною інтенсивністю, який приймають за приблизне положення зорі (рис. 3а). Таке положення може погано відповідати положенню зорі у випадку дуже слабкої або, навпаки, яскравої зорі. Для уточнення положення початкове зображення додається до зображення, яке згладжується, за допомогою гаусової фільтрації, і по ньому визначається положення зорі (рис. 3б). За зображенням зорі знаходять параметр розподілу Гауса σ_s , який апроксимує форму зорі. Цей параметр у подальшому використовують для обчислення величини сигналу від зорі в кадрі. Для цього вибирають максимальний радіус зорі σ_s за обчисленням по двох осях зображення (рис. 3в і 3г). Далі обчислюють сумарну інтенсивність зображення у круговій діафрагмі радіуса $r_s = 2,9\sigma_s$. Рівень фону для зорі розраховують за пікселями в кільцевій діафрагмі $3,2\sigma_s < r_b < 3,9\sigma_s$. Далі вибирають кілька зір порівняння, які обробляють за таким самим алгоритмом, як і зорю, що покривається. Для контролю всі вибрані зорі порівняння позначають кружками із цифрами, які показують номер зорі. Зорю, що покривається, позначають кружком іншого кольору і без цифри (рис. 4).

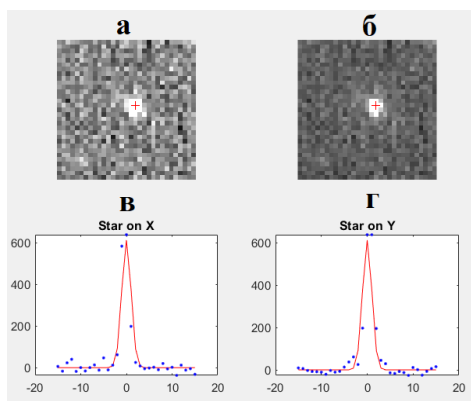


Рис. 3. Вибір зір для отримання фотометричної кривої покриття:
а – початкове зображення зорі, б – зображення зорі з доданим фільтрованим зображенням,
в – фотометричний розріз зорі вздовж осі X, г – фотометричний розріз зорі вздовж осі Y

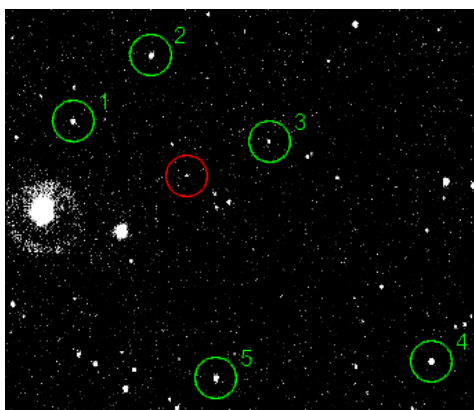


Рис. 4. Фрагмент кадру у процесі отримання фотометричної кривої покриття.
Кружками з номерами відмічено зорі порівняння, кружком без номера позначено зорю, що покривається

Положення зір порівняння запам'ятовують і використовують для оброблення наступних кадрів. Усі наступні кадри обробляють в автоматичному режимі. Зорі порівняння опрацьовують так само, як і для першого кадру. Тільки в цьому випадку наближене положення зорі порівняння беруть згідно з положенням на попередньому кадрі. Положення зорі, що покривається, розраховують за положеннями зір порівняння. Це роблять, щоб урахувати випадок, коли зоря повністю зникає під час покриття.

У кінці опрацювання серії кадрів виводять фотометричні криві зорі, що покривається, та зір порівняння (рис. 5). Ці графіки дають можливість оцінити якість фотометричних даних і прийняти рішення про використання окремих зір порівняння. Фотометричні криві всіх вибраних зір записують у файл. У першому стовпці даних цього файла записують час у секундах відносно початкового моменту, величина якого дорівнює цілій кількості секунд початкового кадру. У другий стовпець заносять рівень яскравості зорі, що покривається, у відносних одиницях. У наступних стовпцях записують фотометричні криві зір порівняння за порядком номерів.

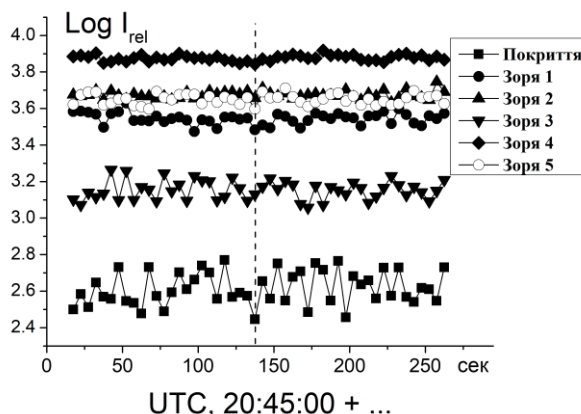


Рис. 5. Фотометричні криві зір, які використано для отримання фотометричної кривої покриття.
Пунктиром позначено ефемеридний час покриття. Номери зір вказано відповідно до рис. 4

Для врахування можливих часових змін прозорості атмосфери, чутливості камери й інших факторів, які впливають на рівень вимірюваного фотометричного відклику, результуюча фотометрична крива покриття отримується після ділення початкової кривої на середньозважену фотометричну криву зір порівняння. Вагу кожної фотометричної кривої розраховують за формулою

$$w_i = \frac{1/\delta_i}{\sum_i 1/\delta_i},$$

де δ_i – відносна похибка фотометричної кривої i зорі. Середньозважену фотометричну криву зір порівняння I_{Σ} розраховують за формулою

$$I_{\Sigma} = \sum_i w_i I_i,$$

де I_i – нормована на 1 фотометрична крива i зорі.

Зазвичай, після такої редукції похибка фотометричної кривої покриття дещо зменшується. У нашому випадку відносна похибка зорі, що покривалася, практично не змінювалася і становила 0,20. Така поведінка свідчить про

стабільність апаратури і прозорості атмосфери під час покриття. Результиуючу фотометричну криву покриття, нормовану на 1, зображено на рис. 6. Пунктиром позначено ефемеридний момент покриття. Крапки позначають межу похибки у $1,5\sigma$. Найменший рівень яскравості зорі якраз припадає на ефемеридний час покриття, і тільки одне це значення на графіку виходить за межі $1,5\sigma$. Імовірність, що це трапилося випадково, а не внаслідок реального покриття, оцінимо, як добуток імовірності того, що величина (беремо нормальний закон розподілення) має відхилення $\geq 1,7\sigma$, та ймовірності випадкового потрапляння цього кадру на ефемеридний момент покриття. Оцінки дають значення підсумкової імовірності $< 0,001$, що свідчить про реальність цього явища. Тоді вважаємо, що покриття дійсно відбулося. У такому випадку зменшення яскравості зорі відбувається за рахунок того, що частину експозиції зоря була закрита астероїдом, а решту – ні. Це дає можливість за зміною яскравості зорі оцінити тривалість покриття.

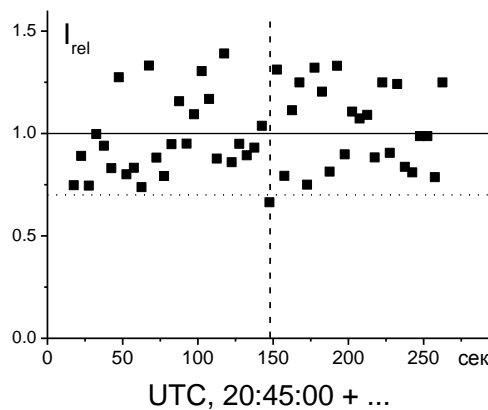


Рис. 6. Фотометрична крива покриття зорі UCAC4 516-047388 астероїдом (853) Нансенія. Крапками позначено межу похибки у $1,5\sigma$. Штрихова лінія позначає ефемеридний момент покриття

Тривалість покриття τ , яка може привести до такого послаблення блиску зорі, що спостерігається на фотометричній кривій, можна розрахувати за формулою

$$\tau = t \frac{1 - I_0/I_s}{1 - I_e/I_s},$$

де t – тривалість експозиції кадру, I_0/I_s – відношення блиску зорі в максимальній фазі покриття до сумарного блиску зорі й астероїда за ефемеридною, I_e/I_s – відношення блиску зорі для експозиції в момент покриття до сумарного блиску зорі й астероїда за фотометричною кривою. Відношення I_0/I_s можна також оцінити із спостережень, коли перед покриттям ми можемо в кадрі окремо виміряти астероїд і зорю. У нашому випадку розрахунки дають значення тривалості покриття $\tau = 2,0 \pm 1,2$ с.

Обговорення і висновки. Отримане значення тривалості покриття в межах похибки відповідає ефемеридним значенням, що свідчить про реальність реєстрації покриття. Продемонстрований підхід дозволяє отримати результати навіть за несприятливих умов спостережень, коли фотометрична крива покриття не демонструє явного ефекту послаблення сигналу. Іноді сам факт, що покриття відбулося, може допомогти встановити межі діаметра астероїда або підтвердити спостереження покриття у другому пункті при низькій яскравості зорі. Цінність таких спостережень зростає, коли спостереження проводять із кількох пунктів. Щоб отримати детальнішу картину покриття, потрібно залучати аматорів, які мають обладнання, придатне для спостереження покриття. Проте у аматорів зазвичай телескопи менших діаметрів і менш чутлива приймальна апаратура, тому потрібно мати можливість отримувати результат і з таких спостережень. Поданий матеріал слід розглядати як підготовку до спостережень покриття у складі мережі з багатьох пунктів, які обладнані різними інструментами.

Підсумовуючи наведене дослідження, доходимо таких висновків.

1. Розроблено програму, яка дозволяє обробляти спостереження покриття у вигляді послідовності графічних файлів.
2. Продемонстровано підхід до інтерпретації спостережень, який можна застосовувати, коли тривалість експозиції кадру більша за тривалість покриття.
3. Зареєстровано покриття зорі UCAC4 516-047388 астероїдом (853) Нансенія під час спостереження на спостережній станції в с. Крижанівка 8 квітня 2021 р. За фотометричною кривою визначено тривалість покриття $2,0 \pm 1,2$ с.

Список використаних джерел

1. Bus S. J. Binzel Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. / S. J. Bus and R. P. Binzel // Icarus. – 2002. – Vol. 158. – P. 146–177.
2. Harris A. W. On the revision of radiometric albedos and diameters of asteroids / A. W. Harris, A. W. Harris // Icarus. – 1997. Vol.126. – P.450–454.
3. Kleshchonok V. V. The Kyiv electronic database of television observations of star occultations by the moon/ V. V. Kleshchonok, N. I. Buromskii, I. V. Kha'ko // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2008. – Vol. 24, Iss. 2. – P 114–118.
4. Kleshchonok, V. V. Observation of Stellar Occultations by Asteroid (259) Alethea and Comet 21P/Jacobini-Zinner / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky, M. V. Lashko// Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2021. – Vol.37, iss 1.– P. 41–51.
5. Masiero J. R. Main-belt Asteroids with WISE/NEOWISE: Near-infrared Albedos / J. R. Masiero, T. Grav, A. K. Mainzer, C. R. Nugent, J. M. Bauer, R. Stevenson, S. Sonnett // The Astrophysical Journal.– 2014. – Vol. 791, Iss. 2, id. 121. – 11 pp.

6. Wright, E. L. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance / E. L. Wright, P. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al. // The Astrophysical Journal. – 2010. – Vol.140. – P. 1868–1881.
7. Zacharias, N. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) / N. Zacharias, C. T. Finch, T. M. Girard, A. Henden, J. L. Bartlett, D. G. Monet, M. I. Zacharias // Astronomical Journal. – 2013. – Vol. 145, id. 44.

Надійшла до редколегії 11.07.2022

V. Kleshchonok, PhD
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
Yu. Gorbanev, PhD,
S. Kimakovsky, Junior Research
Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine

STELLAR OCCULTATION BY THE ASTEROID (853) NANSENIA ON 8 APRIL 2021

Observations of occultations of stars by asteroids provide useful information about the shape and size of asteroids. Ground-based multisite observations are especially valuable in that regard. To this end, on the joint initiative of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine and Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, the development of Ukrainian network of stellar occultation observing stations is currently underway. Asteroids vary greatly in size with small asteroids being dominating. Occultations by small asteroids are visible across a rather narrow path. In such a case, it will not be feasible to make use of the entire network. Moreover, it is not always possible to conduct observations using telescopes with the required primary mirror diameter and light-gathering power or those equipped with special high-speed cameras. First of all, it applies to asteroids small in diameter for which the shadow tracks may run far from stationary telescopes. If this is the case, amateur telescopes or movable systems are employed. The aperture of such telescopes does not enable to acquire observations of occultations of faint stars with short exposure times. However, any observations are useful as they may help to determine the limits of asteroid diameter directly using techniques typical for the photometry of stellar occultations.

This paper presents the results of observations of the star UCAC4 516-047388 occultation by the asteroid (853) Nansenia on 8 April 2021 performed at the Kryzhanovka observation station of Odessa I.I. Mechnikov National University. This observing station will become a part of the network of stellar occultation observers which is currently being set up. A Schmidt telescope ($D = 271.25$ mm, $F = 440$ mm) and Videoscan-415-2001 CCD camera were used to carry out observations. The ICX415AL chip (with the number of effective pixels 782 (H) x 582 (V) and unit cell size of $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$) serves as an interline image sensor for the specified CCD camera. The spectral sensitivity of the CCD camera approximately corresponds to the visible range. The NTP based PC system clock was used for the frame time-stamping. A GPS receiver with a specialised application running in the background was used to set (synchronise) the imaging system computer clock. The exposure duration for the occultation recording was chosen to be 5 seconds in order to acquire an image of the star adequate for photometric measurements, on the one hand, but to minimise the exposure time thus improving temporal resolution, on the other hand.

The star UCAC4 516-047388 has a low brightness of 14.2 m which provides another reason for a long exposure time of 5 seconds to be used. This exposure time exceeds the maximum duration of occultation of 2.8 sec. An approach that enables us to draw a conclusion that the occultation has taken place and also to estimate the duration of such a phenomenon is adopted to construe the photometric (light) curve. Our calculations yield the duration of occultation $\tau = 2.0 \pm 1.2$ sec, which corresponds to the predicted value within the error. This paper also provides a description of the custom software, designed to process observations of occultations in the form of a series of graphic (image) files, which was employed for the stellar occultation by the asteroid (853) Nansenia. This software application can also be used to process observations of amateurs who will become involved in observing stellar occultations.

Key words: asteroids, stellar occultation, photometry.