

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.03.058>

УДК 521.86

**В. В. Клецонок¹, В. Л. Карбовський²,
М. І. Буромський¹, М. В. Лашко²**

¹Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
вул. Обсерваторна, 3, м. Київ, 04053

²Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного 27, м. Київ, 03143
E-mail: klev@observ.univ.kiev.ua, nburomsky@ukr.net,
karb1234@ukr.net, mykhaylo.lashko@gmail.com

Спостереження дотичного покриття зорі ГҮС 1280-832-1 астероїдом (486) Кремона

Наведено опис методу спостережень покриттів зірок тілами Сонячної системи на спеціально виготовленому астрономічному комплексі. У комплексі використовується ПЗЗ-камера Apogee Alta U47, яка працює в режимі синхронного переносу заряду. Описано результати спостережень 5 грудня 2019 р., коли було зареєстровано явище зменшення яскравості зірки ГҮС 1280-832-1 біля ефемеридного моменту покриття астероїдом (486) Кремона. На фотометричній кривій зірки ГҮС 1280-832-1 в момент часу, що збігається у межах похибки з ефемеридним часом покриття, спостерігається ослаблення яскравості. Зменшення яскравості виходить за межі похибки 2σ , яка визначалася по всій довжині треку зірки. Ця величина перевищує можливий рівень похибок фотометрії треку зірки. Проаналізовано можливе пояснення цього ефекту ослаблення світла через короткочасне дотичне покриття, коли зірка не закривається повністю. Для перевірки цього твердження розроблено теоретичну модель формування фотометричної кривої для даного методу спостережень з урахуванням дифракційних явищ і параметрів зображень зір у полі зору. Показано, що таким чином можна пояснити величину і час ослаблення світла. Отримано оцінки параметрів покриття для даної події: мінімальна частка незакритої площі становить $48 \pm 15\%$, що відповідає положенню краю астероїда від центра зірки в долях її радіуса від -0.17 до $+0.21$.

Ключові слова: дотичне покриття, дифракційна картина, астероїд (486) Кремона.

ВСТУП

Спостереження покриттів є достатньо простим і ефективним методом отримання інформації про віддалені об'єкти через дослідження фотометричної кривої явища. В Головній астрономічній обсерваторії НАН України у співпраці з Астрономічною обсерваторією Київського національного університету виготовлено астрономічний комплекс для спостереження явищ покриттів [2, 7]. Він використовує особливий режим роботи ПЗЗ-камери TDI (Time Delay Integration), який забезпечує електронний зсув зображення з затримкою на інтегрування сигналу, у якому накопичення електричного сигналу від об'єкта відбувається одночасно з переносом зарядових пакетів. Швидкість переносу зарядових пакетів вибирається залежно від яскравості зорі, що покривається. Такий режим дозволяє використовувати ПЗЗ-камери високої чутливості навіть за умови відсутності швидкісного зчитування при високій часовій роздільній здатності. Але для інтерпретації результатів отриманих спостережень необхідно використовувати алгоритм, який враховує особливості методу. В цій роботі розглядається алгоритм обробки фотометричної кривої, отриманої з використанням режиму TDI, на прикладі дотичного покриття зорі астероїдом.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Покриття зорі ТУС 1280-832-1 астероїдом (486) Кремона відбулося 5 грудня 2019 р. На рис. 1 показано карту руху тіні від астероїда на поверхні Землі. При спостереженнях використовувався спеціальний комплекс для спостережень покриттів [2, 7] на телескопі *Mirage 7* ($D = 180$ мм, $F = 1800$ мм), встановлений на Астрономічній обсерваторії Київського університету. Очікуваний момент покриття $21:39:57 \pm 2$ с UTC. Висота зорі на момент покриття становила 55° . Зоря ТУС 1280-832-1 має діаметр 1 мсд і яскравість $V = 9.0^m$ і $R = 8.2^m$. Астероїд Кремона належить до астероїдів Головного поясу. Його велика піввісь орбіти дорівнює 2.35276 а. о. Основні фізичні параметри астероїда визначені в роботах [3, 8]: діаметр $d = 22.8$ км, альbedo 0.15 .

Запис покриття відбувався за допомогою ПЗЗ-камери *Apogee Alta U47*, яка працювала в режимі TDI з інтервалом між кроками переносу заряду 0.2 с. Перед самим покриттям були отримані кадри поля для ототожнення треків зір під час запису покриття. Реєстрація часу при роботі комплексу проводилася за системним годинником комп'ютера, точність якого контролювалася за допомогою GPS-приймача і спеціальної програми, яка працювала в фоновому режимі протягом всього циклу спостережень. Точність подібного способу отримання значень моментів UTC за системним годинником комп'ютера становить $10 \dots 15$ мс [6]. Спеціальна програма реєструвала моменти часу на початку та в кінці запису і кількість кроків переносу зарядових



Рис. 1. Карта смуги покриття астероїда (486) Кремона зорі ТУС 1280-832-1, яке відбулося 5 грудня 2019 р.

пакетів. Таким чином можна було розрахувати момент часу для кожного рядка треку зорі.

ОБРОБКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Під час запису покриття зорі фотометруються треки зір. По зображеннях зір на кадрі перед покриттям визначається радіус зорі в пікселях, в який потрапляє 95 % потоку зорі. Збільшення цього радіуса призводить до зменшення відношення сигнал/шум у результатах фотометрії треків. Для кожного рядка запису треку визначається фон по обидві сторони від треку за межами прийнятого радіуса зорі. За пікселями фону обчислюється лінійна апроксимація залежності рівня фонових відліків від осі трека. Для вимірювання яскравості зорі інтегрується сигнал в рядку у межах радіуса зірки із відніманням фонових значень. Для врахування впливів змін чутливості і прозорості атмосфери виконується також фотометрія треків кількох опорних зір. На рис. 2 приведено фрагменти фотометричної кривої треків зорі ТУС 1280-832-1 і зорі порівняння поблизу моменту покриття. На фотометричній кривій зорі ТУС 1280-832-1 в момент часу, який збігається у межах похибки з ефемеридним часом покриття, спостерігається послаблення яскравості, яке виходить за межі похибки 2σ , яка визначалася по всій довжині треку зорі.

Фотометрична крива зорі ТУС 1280-832-1 ділилася на середню зважену фотометричну криву зір порівняння. Вага кожної фотометричної кривої дорівнювала оберненій величині фотометричної похибки цих треків. Фрагмент розрахованої таким чином кривої зорі ТУС 1280-832-1 поблизу ефемеридного часу покриття показано на рис. 3. При такій редукції зберігається відхилення кривої за межі 2σ , хоча загальна похибка не набагато зменшується. Це може свідчити про те, що короткочасне покриття відбулося. Але для перевірки цього

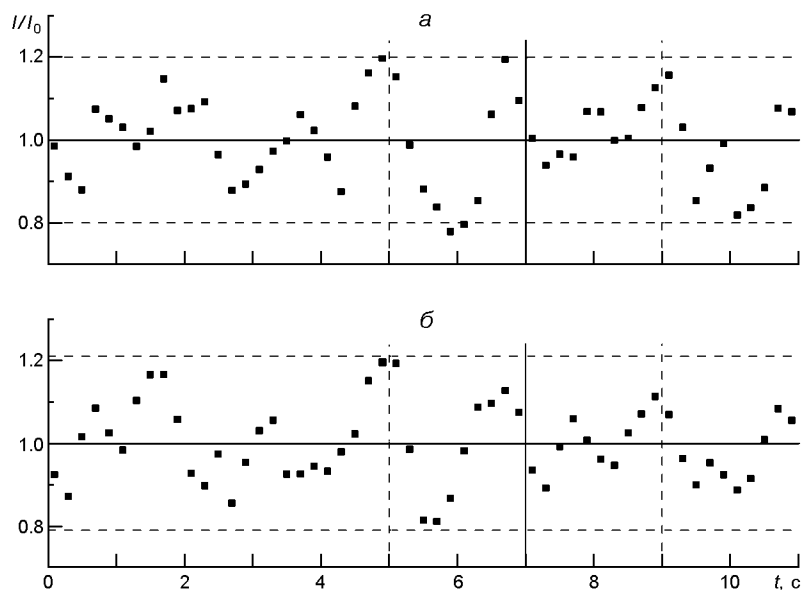


Рис. 2. Фотометричні криві зорі ТУС 1280-832-1, яка покривається астероїдом, та зорі порівняння поблизу ефемеридного часу покриття. Горизонтальні штрихові лінії відмічають відхилення ± 2 , суцільна вертикальна лінія — прогнозований момент покриття, штрихові вертикальні лінії — початок і кінець покриття

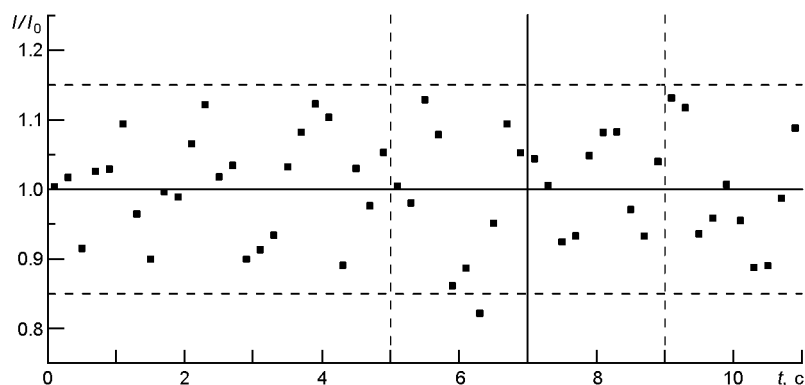


Рис. 3. Редукована фотометрична крива зорі ТУС 1280-832-1 поблизу ефемеридного часу покриття. Горизонтальні штрихові лінії відмічають діапазон ± 2

твердження потрібно уточнити, чи може реальне покриття зорі астероїдом давати подібну картину. Для цього розглянемо теоретичну модель формування фотометричної кривої даним методом спостережень.

ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ

На геоцентричній відстані $r = 1.664$ а.о. відповідний кутовий розмір астероїда (486) Кремона становить 17.2 мсд. Видимий діаметр астероїда набагато більший від видимого діаметра зорі, і тому можемо

скористатися наближенням плоского екрана. Теорія дифракції Френеля дає наступний вираз для зміни яскравості об'єкта під час покриття $I(t)$, коли розмір дифракційної картинки набагато більший від діаметра телескопа [5, 9]:

$$I(t) = \int_{X(t)}^{R_s} d^2 F(\theta) E(\theta) d, \quad (1)$$

де $E(\theta)$ — розподіл спектральної яскравості в зображенні зорі для системи зоря + приймач + фільтр + телескоп + атмосфера у межах смуги пропускання $\lambda_1 - \lambda_2$, d — площа вхідного отвору телескопа, $F(\theta)$ — профіль яскравості джерела випромінювання вздовж напрямку руху краю астероїда (стріп-розподіл), R_s — кутовий радіус зорі, $X(t)$ — положення краю астероїда відносно центра зорі, $F(\theta)$ — дифракційна картинка від точкового монохроматичного джерела. Функція $F(\theta)$ визначається через інтеграли Френеля $S(\theta)$ і $C(\theta)$ для безрозмірної величини θ :

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} S(\theta)^2 + \frac{1}{2} C(\theta)^2 \right],$$

$$S(\theta) = \int_0^{\sqrt{2} \theta} \sin \frac{z^2}{2} dz, \quad C(\theta) = \int_0^{\sqrt{2} \theta} \cos \frac{z^2}{2} dz,$$

Тут θ — відстань до астероїда, $\sqrt{2} \theta$ — кутова відстань, яка відраховується від центра зорі. Спектральний розподіл $E(\lambda)$ реєстрованого світла визначається з виразу

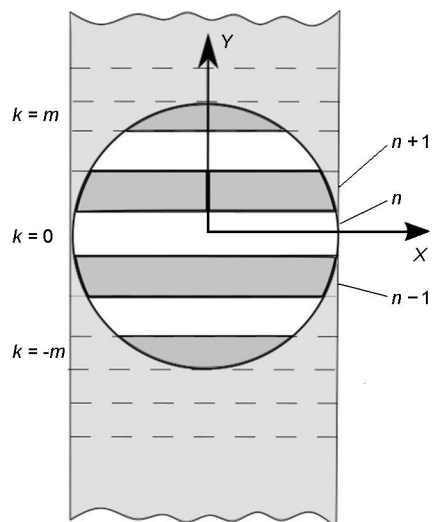
$$E(\lambda) = E_s(\lambda) Q(\lambda) P_1(\lambda) P_2(\lambda) P_3(\lambda),$$

де $E_s(\lambda)$ — розподіл енергії в спектрі зорі, $Q(\lambda)$ — спектральна чутливість фотоприймача, $P_1(\lambda), P_2(\lambda), P_3(\lambda)$ — спектральні криві пропускання фільтрів, атмосфери і телескопа відповідно.

Дифракційна картинка реєструється за допомогою ПЗЗ-камери, поле зору якої складається зі світлочутливих пікселів і яка працює в режимі переносу заряду. На сигнал, який отримується таким чином, впливають два фактори. Перший пов'язаний з тим, що розмір точкового зображення займає кілька пікселів. Тому на інтенсивність треку зорі в даний час впливає не тільки яскравість зорі в даний момент часу, але і у кількох попередніх і наступних інтервалах часу. Профіль точкового зображення встановлюється за допомогою зображень зір поля зору. Другий ефект виникає через кінцеву швидкість переносу заряду, коли зображення переміщується на наступний крок з часом переносу (рис. 4). Інтенсивність вздовж трека зорі для n -го рядка $I(n)$ дорівнює

$$I(n) = \sum_{k=m}^m \sum_{(n-k)}^{(n-k)} w_k I(t - t_s) dt, \quad (2)$$

Рис. 4. Формування треку зорі через накладання зображень зорі в різні моменти часу



де t_s — момент початку запису треку зорі, w_k — вагові коефіцієнти, які розраховуються за зображенням зорі, $m + 1$ — радіус зображення зорі (рис. 4). Якщо сканування виконується вздовж осі Y , то

$$w_k = \frac{\int_{x_m}^{x_{m+1}} \int_{y_m}^{y_{m+1}} i(x, y_k) dx dy}{\int_{x_m}^{x_{m+1}} \int_{y_m}^{y_{m+1}} i(x, y) dx dy}$$

де $i(x, y)$ — розподіл інтенсивності в зображенні зорі при умові, що $i(0,0)$ — піксел з максимальною яскравістю.

Обставини покриття зорі астероїдом показано на рис. 5. Тут R_a — радіус астероїда, R_s — видимий лінійний радіус зорі на відстані астероїда, d — мінімальна відстань між центрами астероїда та зорі. X — координата центра астероїда, яка відраховується від точки максимального зближення центрів астероїда та зорі O . Вона розраховується за формулою

$$X = V(t - t_0),$$

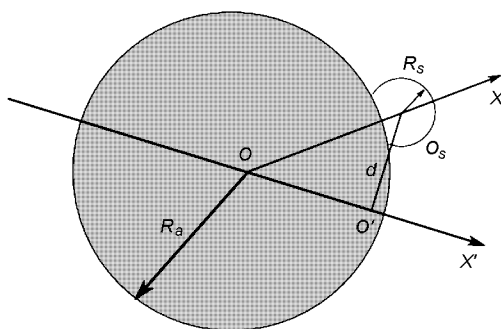


Рис. 5. Обставини покриття зорі астероїдом сферичної форми

де t_0 — час, коли центр астероїда буде в точці O , V — кутова швидкість астероїда. X — координата краю астероїда у формулі (1), яка відраховується від центра зорі O_s . Вона розраховується за формулою

$$X = \begin{cases} R_s, & \text{для } \sqrt{X^2 - d^2} > R_a - R_s, \\ \sqrt{X^2 - d^2} - R_a, & \text{для } R_a - R_s < \sqrt{X^2 - d^2} < R_a + R_s, \\ R_s, & \text{для } \sqrt{X^2 - d^2} < R_a - R_s. \end{cases}$$

У випадку однорідного диску зорі стріп-розподіл яскравості вздовж осі X у відносних одиницях має вигляд

$$B(x) = \frac{2\sqrt{R_s^2 - x^2}}{R_s^2}.$$

Можливе також врахування неоднорідності поверхневої яскравості диску за рахунок потемніння зорі до краю за стандартним законом

$$B(x) = B_0 \left(1 - a \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_s^2}}\right),$$

де a — коефіцієнт потемніння до краю, B_0 — яскравість в центрі зорі. В такому випадку стріп-розподіл у відносних одиницях матиме вигляд

$$B(x) = \frac{3\sqrt{R_s^2 - x^2}}{(3 - a)R_s^2} - \frac{2 - 2a}{2R_s^2} \frac{a\sqrt{R_s^2 - x^2}}{2R_s^2}. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

Для розрахунків використовувалась спектральна чутливість ПЗЗ камери Apogee Alta U47 (<http://www.birtwhistle.org.uk/U47.pdf>). Для знаходження спектру зорі з каталогу [4] було використано її показник кольору $CI_{B-V} = 1.26$. Такий показник відповідає зорі спектрального класу К. Типовий спектр зорі та прозорість атмосфери бралася з довідника [1]. При обчисленні модельних фотометричних кривих в даному випадку не враховувалось потемніння зорі до краю. Результати розрахунків за даною моделлю показано на рис. 6. На ньому точками показано спостережувану фотометричну криву зорі ТУС 1280-832-1 під час покриття, лінією 1 — криву реєстрації приймачем з нульовою експозицією, тобто з врахуванням тільки дифракційних явищ для даного пункту спостереження, лінією 2 — розраховану криву покриття з врахуванням виміряних розмірів зображень зір на кадрі та величини кроків по часу при реєстрації покриття.

Порівняння модельних і спостережних даних дозволило визначити набір параметрів моделі, які можуть описати наявну фотометричну

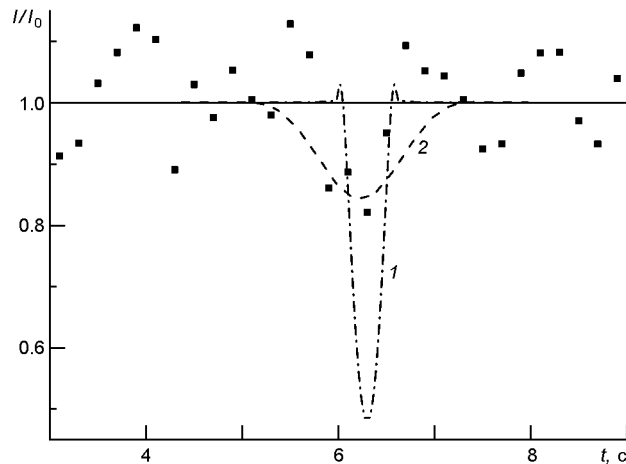


Рис. 6. Фотометрична крива зорі ГҮС 1280-832-1 під час покриття (точки), крива покриття з врахуванням тільки дифракційних явищ (штрих-пунктирна лінія 1), і розрахована крива покриття з ПЗЗ в режимі TDI (штрихова лінія 2)

криву. Максимальна фаза покриття припадає на $21:39:56.3 \pm 0.2$ с UTC, початок $21:39:56.1 \pm 0.2$ с UTC. Головною особливістю даного покриття є те, що астероїд не повністю закрит зорю. Тобто, відбулося так зване дотичне покриття, яке добре відоме для покриттів зір Місяцем. Мінімальна доля незакритої площі становила 48 ± 15 %, що відповідає положенню краю астероїда від центра зорі від -0.17 до $+0.21$ в долях її радіуса.

Застосування даного методу інтерпретації спостережень покриттів з камерами, які працюють в режимі TDI, дозволить уточнити параметри таких подій. Особливо важливим є уточнення часу початку і кінця покриття, оскільки це дозволяє точніше визначати розміри тіл, які покривають зорі. Врахування особливостей цього методу дозволяє якісно розшифрувати дифракційну картину, якщо вона наявна на фотометричній кривій, що дозволить оцінювати діаметр зорі, яка покривається астероїдом.

ВИСНОВКИ

Спостереження покриття зорі ГҮС 1280-832-1 астероїдом (486) Кремена, яке було виконано 5 грудня 2019 р. за допомогою комплексу для спостереження явищ покриттів на телескопі *Mirage 7* ($D = 180$ мм, $F = 1800$ мм) в Астрономічній обсерваторії Київського університету, вказує на можливість реєстрації дотичного покриття, при якому у максимальній фазі доля незакритої площі становить 48 ± 15 %. Покриття почалося $21:39:56.0 \pm 0.2$ с UTC, максимальна фаза відбулася через 0.2 с після початку.

Розроблено модель реєстрації покриття ПЗЗ камерою в режимі сканування TDI з урахуванням дифракційних явищ, яка дозволяє уточнити параметри покриття зір астероїдами, розміри астероїдів та оцінки діаметрів зір.

1. Аллен К. У. *Астрофизические величины*. М.: Мир. 1977. 448 с.
2. Карбовський В., Клещонко В., Буромський М. Програмний та апаратний комплекс для спостереження покриття зір астероїдами. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія*. Київ, 2017. № 2 (56). С. 41—44.
3. Hanuš J., Durech J., Brož M., et al. A study of asteroid pole-latitude distribution based on an extended set of shape models derived by the lightcurve inversion method. *Astron. and Astropys.* 2011. 530. A134.
4. Høg E., Fabricius C., Makarov V. V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *Astron. and Astropys.* 2000. 355. P. L277—L30.
5. Kleshchonok V. V. Diffraction effects in the processing of television observations of stellar occultations by the Moon. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 2011. 27(1). P. 50—57.
6. Kleshchonok V. V., Buromsky M. I. First results of observations with astronomical television complex “Spalakh” for fast processes registrations. *Visnyk of Kyiv University.* 2004. 42.
7. Kleshchonok V. V., Karbovsky V. L., Buromsky M. I., Lashko M. V. Observation of stellar occultations by asteroid (259) Alethea and comet 21P/Jacobini—Zinner. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 2021. 37(1). P. 41—51.
8. Masiero J. R., Grav T., Mainzer A. K., et al. Main-belt asteroids with WISE/NEOWISE: near-infrared albedos. *Astrophys. J.* 2014. 791:121.
9. Richichi A. Model-independent retrieval of brightness profiles from lunar occultation lightcurves in the near infrared domain. *Astron. and Astrophys.* 1989. 266. P. 366—372.

REFERENCES

1. Allen C. W. (1977). *Astrophysical Quantities*. М.: Mir. 448 (In Russian).
2. Karbovsky V., Kleshchonok V., Buromsky M. (2017) Software and hardware complex for observation of star occultations by asteroids. *Bull. Nat. Taras Shevchenko Univ. Kyiv. Astron.* 2(56). 41—44. (In Ukrainian).
3. Hanuš J., Durech J., Brož M., et al. (2011) A study of asteroid pole-latitude distribution based on an extended set of shape models derived by the lightcurve inversion method. *Astron. and Astropys.* 530. A134.
4. Høg E., Fabricius C., Makarov V. V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. (2000) The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *Astron. and Astropys.* 355. L277—L30.
5. Kleshchonok V. V. (2011) Diffraction effects in the processing of television observations of stellar occultations by the Moon. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 27(1). 50—57.
6. Kleshchonok V. V., Buromsky M. I. (2004) First results of observations with astronomical television complex “Spalakh” for fast processes registrations. *Visnyk of Kyiv University.* 42.

7. Kleshchonok V. V., Karbovsky V. L., Buromsky M. I., Lashko M. V. (2021) Observation of stellar occultations by asteroid (259) Alethea and comet 21P/Jacobini—Zinner. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 37(1). 41—51.
8. Masiero J. R., Grav T., Mainzer A. K., et al. (2014) Main-belt asteroids with WISE/NEOWISE: near-infrared albedos. *Astrophys. J.* 791:121.
9. Richichi A. (1989) Model-independent retrieval of brightness profiles from lunar occultation lightcurves in the near infrared domain. *Astron. and Astrophys.* 266. 366—372.

V. V. Kleshchonok¹, V. L. Karbovsky², M. I. Buromsky¹, M. V. Lashko²

¹Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

OBSERVATION OF THE GRAZING OCCULTATION OF THE STAR TYC 1280-832-1 BY THE ASTEROID (486) CREMONA

A description of the method for observing the occultation of stars by asteroids at the astronomical complex for observing the occultation of stars by Solar system bodies is given. The complex uses an Apogee Alta U47 CCD camera as a light detector, which operates in a time delay and integration (TDI) mode. Results of the study of the occultation phenomenon of the stars TYC 1280-832-1 by the asteroid (486) Cremona on December 5, 2019, which was obtained using this complex, are described. The decrease in brightness on the photometric curve of the star TYC 1280-832-1, at the moment of time that corresponds within the error with the ephemeris occultation time is observed. The decrease in brightness goes beyond the 2 σ error, which was determined along the entire length of the star's track. This value exceeds the possible level of photometry errors of the star track. A possible explanation for this effect of light attenuation through a short-term grazing occultation, when the star does not completely close, is analyzed. The theoretical model of the formation of a photometric curve for this observation method taking into account diffraction phenomena and parameters of stars in the field of view has been developed to verify this statement. It is shown that this can explain the magnitude and time of bright attenuation. The obtained estimates of the occultation parameters for this event: the minimum fraction of the uncovered area is $48 \pm 15\%$, which corresponds to the position of the edge of the asteroid from the center of the star in fractions of its radius from -0.17 to $+0.21$.

Keywords: grazing occultation, diffraction pattern, asteroid (486) Cremona

Стаття надійшла до редакції 02.02.2021

Після доопрацювання 02.02.2021

Прийнята до друку 18.02.2021