

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ПОЗАФОКАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ КРИВИХ БЛИСКУ ЗМІННИХ ЗІР

У роботі розглянутий новий метод побудови кривих блиску змінних зір різних типів на основі візуальних спостережень – метод граничних позафокальних зображень. Показано, що за допомогою цього методу можна отримати криві блиску, які мало поступаються за своєю точністю кривим, побудованим на основі традиційних методик.

Ключові слова: змінна зоря, крива блиску, видима зоряна величина, метод Аргеландера, метод Пікерінга, метод Нейланда-Блажко, метод Горанського, метод граничних позафокальних зображень.

Постановка проблеми. Сучасна астрономія нараховує приблизно до ста тисяч змінних зір декількох десятків типів. Близько 3000 змінних зір відкрито у найближчих галактиках – Магеланових Хмарах та близько 700 – у Туманності Андромеди.

Багато фізичних характеристик змінних зір можна отримати аналізуючи криву їх блиску. Серед найбільш розповсюджених (традиційних, класичних) візуальних методів оцінки видимого блиску зір – методи Аргеландера, Нейланда-Блажко, Пікерінга.

Актуальність теми дослідження пов'язана з наявністю в методах Аргеландера, Нейланда-Блажко, Пікерінга, Горанського та в модифікаціях цих методів цілого ряду недоліків, які призводять до труднощів в оцінці блиску деяких класів змінних

зір при проведенні аматорських спостережень без використання цифрової фотометричної апаратури. Отже, актуальним є питання про можливість розробки нового методу візуальної оцінки блиску змінних зір, який не був би обтяжений недоліками традиційних методів, розширював би можливості побудови кривих блиску змінних зір на якомога ширший клас цих об'єктів.

Методами дослідження слугували методи теоретичного розрахунку та практичного співставлення даних, отриманих з власних спостережень за допомогою розробленої аналітичної теорії та за допомогою традиційних методів Пікерінга, Аргеландера, Нейланда-Блажко, Горанського та модифікацій цих методів.

Аналіз публікацій. У багаточисельній спеціальній астрономічній літературі [1, 6, 9, 11, 13] та у науково-популярній [8, 10, 14] доволі детально описана методика спостережень за змінними зорями та техніка обробки результатів спостережень. При цьому, всі книги та статті присвячені цим та суміжним питанням оперують лише традиційними методами оцінки блиску зір: методами Аргеландера, Пікерінга, Нейланда-Блажко, Горанського та модифікаціями цих методів [1, 3, 5, 6, 9, 11, 13].

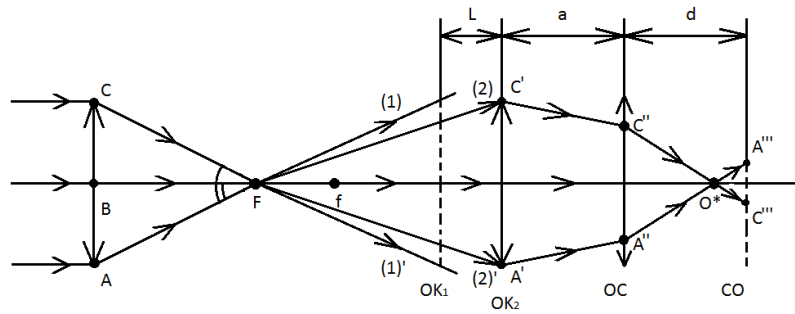
Водночас, відомо, що всі вказані методи мають свої межі [1, 5, 6, 13] і не до всіх класів змінних зір [2, 3, 4, 7] можна застосовувати оцінку їх блиску за класичними методами. Зрозуміло, що не існує (та й не може існувати) універсального, позбавленого недоліків методу оцінки видимого візуального блиску змінних зір [1, 5, 6, 13], можлива лише обмежена певними умовами спостережень та класами змінних зір [2, 3, 4, 7] методика оцінок їх блиску.

Мета роботи. Перевірка гіпотези наукового дослідження про можливість оцінки блиску змінних зір за допомогою методу граничних позафокальних зображень – альтернативного до традиційних методів Аргеландера, Нейланда-Блажко, Пікерінга, Горанського.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опишемо коротко теоретичні положення методу граничних позафокальних зображень стосовно до фотометрії змінних зір, а також методику оцінок блиску зір за цим методом.

На мал. 1 приведена оптична схема утворення зображення у телескопічній системі при проведенні візуальних спостережень оком, якщо окулярна частина розфокусована на відстань l відносно фокального положення окуляра.

Точка В – оптичний центр об'єктива Об; СА – апертура об'єктива; f та F – фокуси об'єктива та окуляра (Ок) відповідно; СО – сітківка ока; В, O^* – відповідно оптичні центри об'єктива, та сітківки ока. Відстань a забезпечує рівнозіницеве зображення при якому діаметри робочої частини окуляра та зіниці ока рівні між собою ($d_{ок} = d_{зн}$); d^* – повздовжній розмір очного яблука; $d_{ок} = A'C'$; $d_{зн} = A''C''$.



Мал. 1. Оптична схема утворення зображення у розфокусованій телескопічній системі при проведенні візуальних спостережень очом

Пучок променів, який виходить з фокуса об’єктива є розбіжним (конус (1) F(1')). Апертура окуляра A'C' захоплює при цьому лише частину променів з конуса (1) F(1'), саме ті промені, які входять до конуса (2) F(2') і направляє їх на зіницю у вигляді збіжного пучка, обмеженого лініями C'C'' та A'A''. Апертурою зіниці при цьому є вже A''C'', яка менша за d_{зн}. Після заломлення в зіниці промені перетинаються в точці O*, яка розташована перед сітківкою ока. В результаті на сітківці CO утворюється розмите зображення точки F– пляма діаметром A'''C'''.

Приведемо аналітичні розрахунки, які описують сутність методу позафокальних зображень у фотометрії змінних зір.

Нехай: Φ_{пад} – світловий потік, що падає нормально на об’єктив площею поперечного перерізу S_{об}, а E_m* – видимий блиск зорі, яку спостерігаємо. Тоді, очевидно, має місце наступна рівність:

$$\Phi_{пад} = S_{об} E_m^* \tag{1}$$

Враховуючи, що оптична система не є ідеальною і частина η_T світлового потоку поглинається, для потоку Φ_{пр}, який пройшов телескопічну систему, можемо записати з оглядом на (1)

$$\Phi_{пр} = \eta_T S_{об} E_m^* \tag{2}$$

Площі поперечних перерізів об’єктиву та зіниці ока розраховуємо за формулами

$$S_{об} = \frac{\pi}{4} D_{об}^2 \tag{3}$$

$$S_{зн} = \frac{\pi}{4} d_{зн}^2 \tag{4}$$

Тоді для видимого блиску зображення зорі маємо

$$E_{зн}^* = \frac{\Phi_{пр}}{S_{зн}} \tag{5}$$

Врахувавши попередні вирази (2 – 5), отримуємо

$$E_{зн}^* = \frac{\eta_T S_{об} E_m^*}{S_{зн}} = \eta_T \left(\frac{D_{об}}{d_{зн}} \right)^2 E_m^* \tag{6}$$

З формули Погсона для мінімального блиску зорі, яку можна побачити при візуальних спостереженнях у телескоп, маємо

$$\frac{E_{min}^*}{E_0^*} = 2,512^{-m_{min}}, \tag{7}$$

де E_{min}* – видимий блиск зорі нульової візуальної видимої зоряної величини. Водночас, для мінімального блиску зорі, яку можна побачити при візуальних спостереженнях неозброєним оком можна записати:

$$\frac{(E_{3H}^*)_{min}}{E_0} = 2,512^{-6}. \quad (8)$$

Виходячи з виразів (6) – (8) отримуємо

$$2,512^{-m_{min}} \eta_T \left(\frac{D_{об}}{d_{3H}} \right)^2 = 2,512^{-6}. \quad (9)$$

В ідеальному випадку ($\eta = 1$) та прийнявши, що у темряві зіниця ока має діаметр 6 мм з (9) впливає

$$m_{min} \equiv m_{гр} \cong 2.1^m + 5 \lg D_{об}. \quad (10)$$

Отже, телескоп в ідеальному випадку дає можливість спостерігати зорі, видимий візуальний блиск яких менший за граничний блиск (6^m), що сприймає неозброєне око на Δm зоряних величин; врахувавши (10), маємо

$$\Delta m = m_{гр} - 6 = -3,9^m + 5 \lg D_{об}. \quad (11)$$

З подібності осьових перерізів конусів (1)F(1') та (2)F(2') – мал. 1, виходить

$$\frac{f}{d_{ок}} = \frac{f+l}{d^*}$$

звідси,

$$\frac{d^*}{d_{ок}} = 1 + \frac{l}{f}. \quad (12)$$

Тоді для величини сприйнятого оком світлового потоку $\Phi_{сп}$ з (12) виходить

$$\Phi_{сп} = \Phi_{пр} \left(\frac{d^*}{d_{ок}} \right)^2 = \left(1 + \frac{l}{f} \right)^2 \Phi_{пр}. \quad (13)$$

Виконаємо ланцюжок еквівалентних перетворень (13):

$$\begin{aligned} \frac{\Phi_{пр}}{\Phi_{сп}} &= \left(1 + \frac{l}{f} \right)^{-2} = 2,512^{\Delta m^* + 3,9^m - 5 \lg D_{об}}, \\ -2 \lg \left(1 + \frac{l}{f} \right) &= 0,4(\Delta m^* + 3,9^m - 5 \lg D_{об}), \\ \Delta m^* &= 5 \lg \left(\frac{D_{об}}{1 + \frac{l}{f}} \right) - 3,9^m. \end{aligned} \quad (14)$$

Нехай тепер l_0 – величина повздовжнього (вздовж тубусу телескопу) зміщення окулярної частини при повороті мікрометричного гвинта фокусування на N_0 поділок; l – величина повздовжнього (вздовж тубусу телескопу) зміщення окулярної частини при повороті мікрометричного гвинта фокусування на N поділок. Тоді, очевидно, виконується рівність

$$\frac{l_0}{N_0} = \frac{l}{N} \rightarrow l = N \frac{l_0}{N_0}.$$

З якої та з (14) слідує

$$\Delta m^* = 5 \lg \left(\frac{D_{об}}{1 + \frac{N l_0}{f N_0}} \right) - 3,9^m,$$

або ж

$$\Delta m^* = 5 \lg \left(\frac{D_{\text{об}} N_0 f}{N_0 f + N l_0} \right) - 3,9^m. \quad (15)$$

Звідси для граничної візуальної видимої зоряної величини, яку ще можна буде побачити в окулярну частину спостерігачу, ми отримуємо наступний вираз:

$$m_{\text{гр}}^* = \Delta m^* + 6^m = 5 \lg \left(\frac{D_{\text{об}} N_0 f}{N_0 f + N l_0} \right) + 2,1^m. \quad (16)$$

Нехай

$$\begin{aligned} 2,1^m + 5 \lg(D_{\text{об}} N_0 f) &= \alpha, \\ N_0 f &= \beta. \end{aligned}$$

Тоді, підставляючи останні вирази у (16), маємо

$$m_{\text{гр}}^* = \alpha - 5 \lg(\beta + l_0 N).$$

Представляючи зміщення окулярної частини при повороті мікрометричного гвинта фокусування на N поділок як неперервну функцію від x ($N = x$), ми останній вираз можемо представити у вигляді

$$m_{\text{гр}}^* = \alpha - 5 \lg(\beta + l_0 x). \quad (17)$$

Залежність (17) і є робочою формулою для теоретичного розрахунку граничної візуальної видимої зоряної величини, яку ще можна буде побачити в окулярну частину спостерігачу (граничне позафокальне зображення зорі).

Ми в своїй практиці астрономічних спостережень за змінними зорями використовували наступні астрономічні прилади: бінокль VIXEN type B4 wide 30x80 FMC; бінокляр DeepSky 20.40x100, 45; телескоп UFO 114/1000 EQ1.

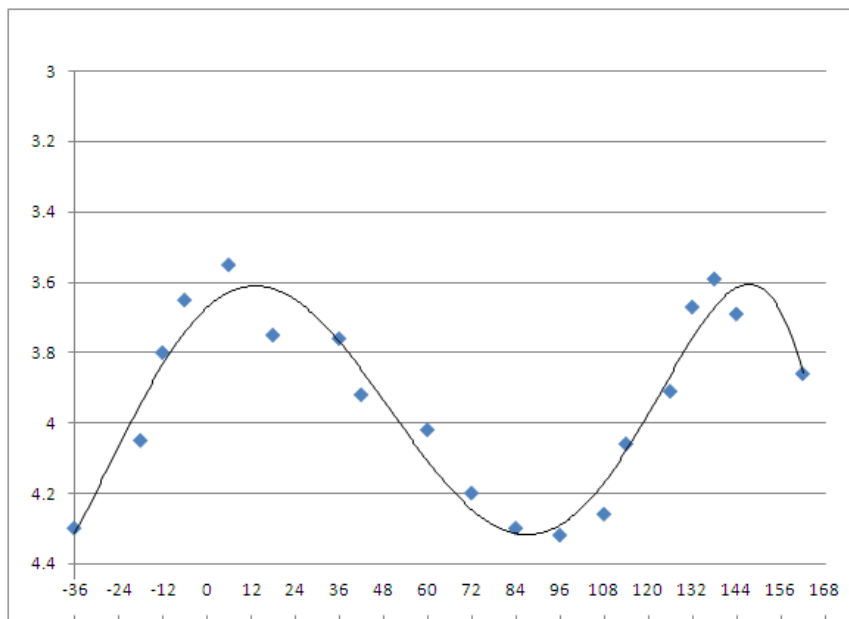
Практична реалізація теоретичних положень, які були розвинені у попередньому розділі, знайшла своє відображення в розмітці мікрометричної шкали в окулярній частині деяких з представлених вище оптичних приладів, і яка нагадує шкалу мікрометрів. Калібровка та розмітка мікрометричної шкали окуляра здійснювалось у декілька етапів.

Співвідносність мікрометричної шкали та шкали видимих зоряних величин досягалась наступним чином. Дочекавшись ясної погоди, ми, використовуючи дані віртуального планетарію Stellarium, знали значення видимої зоряної величини (в системі V) деякої обраної нами зорі, які вона мала у певні фіксовані моменти часу на ту календарну дату в яку ми проводили експеримент. Обрана нами зоря змінювала свій блиск в результаті поглинання світла в атмосфері. Чим більшим було значення зенітної відстані зорі, тим більшим було поглинання її світла, а, отже, тим більшою була і видима зоряна величина цієї зорі.

Обертаючи рухоми окулярну частину добивались такого розфокусування зображення зорі при якому воно зникало на фоні поля зору окуляра. За розміщеною мікрометричною шкалою визначали значення, яке відповідало такому розфокусуванню. Знаючи за даними Stellarium видиму зоряну величини зорі на момент коли досягалось граничне розфокусування, ми, очевидно, могли поставити у відповідність отримане значення на мікрометричній шкалі миттєвому значенню видимої зоряної величини нашої зорі. Обираючи декілька "опорних" зір видимі зоряні величини яких відповідали інтервалу зміни блиску змінної зорі можна було скласти таблицю в якій певним значенням на мікрометричній шкалі відповідають певні значення видимої зоряної величини.

Проводячи спостереження за вибраною змінною зорею у фіксовані моменти часу, розфокусовуємо зображення змінної зорі до його зникнення на тлі неба. Фіксуємо значення на мікрометричній шкалі, яке відповідає цьому моменту. Використовуючи таблицю співвідносності "покази мікрометричної шкали-миттєве значення видимої зоряної величини", встановлюємо значення видимої зоряної величини змінної зорі з урахуванням поглинання світла в атмосфері для цього моменту. Повторюючи цю процедуру через певні інтервали часу поступово отримуємо залежність $m_v(t)$. Вибравши зручні одиниці вимірювання можемо графічно представити залежність $m_v(t)$, отримавши таким чином, повну криву блиску змінної зорі або її частину.

На мал. 2 представлена отримана нами крива зміни блиску цієї ж класичної цефеїди δ Cep із застосуванням методу позафокальних зображень (вздовж осі абсцис для зручності відкладені умовні одиниці періоду зміни блиску цефеїди). Вздовж осі ординат відкладені значення $m_v(t)$.



Мал. 2. Крива блиску змінної зорі δ Сер отримана за допомогою методу граничних позафокальних зображень

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті проведеного дослідження була підтверджена гіпотеза про можливість розробки аналітичної теорії оцінки видимої візуальної зоряної величини змінних зір не обтяженої недоліками, притаманними традиційним методикам. Показано, що отримані результати можна застосовувати і до проведення оцінок блиску зір з невеликими амплітудами та періодами зміни блиску. В роботі приведені пропозиції по практичній реалізації розробленої методики оцінку блиску змінних зір.

Запропонований в роботі метод граничних позафокальних зображень вимірювання видимої візуальної зоряної величини змінних зір різних типів та класів, очевидно, допускає модифікації, зміст яких можна встановити при подальшій роботі над тематикою даного дослідження.

Використані джерела

1. Астрономічний календар. Постійна частина ВАГО. – Москва: Наука, 1973. – 730 с.
2. Астрономічний енциклопедичний словник / За заг. ред. І. А. Климишина та А. О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.
3. Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки о Вселенной / Б. А. Воронцов-Вельяминов. – Москва: Наука, 1980. – 680 с.
4. Дагасв М. М. Наблюдение звездного неба / М. М. Дагасв. – Москва: Наука, 1988. – 176 с.
5. Сфремов Ю. Н. В глубины Вселенной / Ю. Н. Сфремов. – Москва: Наука, 1977. – 224 с.
6. Зигель Ф. Ю. Неисчерпаемость бесконечности / Ф. Ю. Зигель. – Москва: Детская література, 1984. – 254 с.
7. Івлев О. А. Наблюдение звездного неба в телескоп / О. А. Івлев. – Москва: Космоинформ, 2004. – 48 с.
8. Кукаркин Б. В., Паренаго П. П. Переменные звезды и способы их наблюдения / Б. В. Кукаркин, П. П. Паренаго. – Москва-Ленинград: ОГИЗ. Гостехиздат, 1989. – 360 с.
9. Самусь Н.Н. Переменные звёзды: [учебное пособие по курсу "Астрономия"]. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://heritage.sai.msu.ru/>
10. Скворцов Є. Ф. Астрономія / Є. Ф. Скворцов. – Москва, 2005. – 278 с.
11. Холопов П. Н. О классификации переменных звезд / П. Н. Холопов // Переменные звезды. – 1981. – № 21. – С. 465–484.
12. Цесевич В. Переменные звезды и их наблюдение / В. Цесевич. – Москва: Наука, 1970. – 239 с.
13. Kazarovets E. V., Samus N. N., Durlевич O. V., Kireeva N. N., Pastukhova E. N., and Pojmanski G., A Catalog of Variable Stars Based on the New Name List ASTRONOMY REPORTS.
14. Samus N. N. [Moscow Inst. Astron.], O. V. Durlевич [Sternberg Astron. Inst., Moscow] (12-Feb-2009). GCVS Variability Types and Distribution Statistics of Designated Variable Stars According to their Types of Variability. GCVS.

**THE APPLICATION OF THE METHOD
OF BOUNDARY EXTRAFOCAL IMAGES FOR THE CONSTRUCTION
OF LIGHT CURVES OF VARIABLE STARS**

The construction and analysis of the light curves of variable stars is one of the fundamental methods for studying processes and phenomena occurring with variable stars or in systems of multiple stars, which include variable stars. Numerous special astronomical literature describes in some detail the method of observing variable stars, the technique for processing the results of observations, methods for constructing the light curves of variable stars: Argelander, Pickering, Neiland-Blazhko, Goransky, and the modification of these methods.

All of the above methods have their own application boundaries. Therefore, each of the classical methods of visual estimates of the brightness of stars and its modified versions can be used only for a certain type of variable stars.

Proceeding from this, there arises the question of the possibility of developing a new method of eye estimation of the brightness of variable stars that would not be burdened by most of the drawbacks of traditional methods and simultaneously which could be applied to a wider set of types and classes of variable stars when conducting amateur observations without the use of digital photometric equipment. This is due to the relevance of the topic of our study. The proposed method of visual estimation of the visible visual stellar magnitude of variable stars of different types and spectral classes is based on obtaining their limiting positional images, that is, images whose brightness coincides with the brightness of the night sky in the part in which we observe the variable star.

It is shown that the results obtained can also be used to make eye-light estimates of the brightness of stars with small amplitudes and periods of brightness variation. The paper contains proposals on the practical implementation of the developed method for estimating the brightness of variable stars.

Key words: *variable star, light curve, apparent stellar magnitude, Argelander method, Pickering method, Neiland-Blazhko method, Goransky's method, method of boundary extrafocal images.*

*Стаття рекомендована кафедрою фізики Інституту точних наук і економіки
Ніжинського державного університету ім. М. Гоголя*

Надійшла до редакції 25.05.2018