

УДК 523.9+520.82+520.86+521.81

**В. О. Данилевський**

Астрономічна обсерваторія Київського університету ім. Тараса Шевченка.  
04053, Київ, вул. Обсерваторна 3

### **Криві блиску повного затемнення Сонця у місцях його фотометричних спостережень**

*Криві блиску повного затемнення Сонця, зареєстровані за допомогою фотоелектричних фотометрів, можуть бути використані для визначення кутового діаметра сонячного диска. Для цього необхідно одержати високоточні спостережні калібровані криві блиску та побудувати адекватні їм теоретичні моделі. Показано шлях побудови теоретичної кривої блиску, яка враховує розподіл яскравості на краю сонячного диска, зокрема у хромосфері за межами видимого диска, а також нерівності рельєфу на краю диска Місяця. Оцінено ефект дифракції сонячного випромінювання на ньому. Викладено процедуру побудови кривих блиску за даними фотометричних спостережень затемнення 11 серпня 1999 р., каліброваних за блиском цілого сонячного диска з максимальним значенням середніх квадратичних похибок не більше за 10 %. За певних припущень щодо розподілу яскравості на краю сонячного диска обчислено теоретичні криві блиску для кожного з місць спостережень. З порівняння теоретичних кривих блиску зі спостережними випливає, що процедури спостережень та редукації результатів загалом не обтяжені грубими помилками, а процедура побудови теоретичних кривих в основному правильно враховує його головні параметри.*

**КРИВЫЕ БЛЕСКА ПОЛНОГО ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА В МЕСТАХ ЕГО ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**, Данилевский В. А. — Кривые блеска полного затмения Солнца, зарегистрированные при помощи фотоэлектрических фотометров, могут быть использованы для определения углового диаметра солнечного диска. Для этого необходимо получить высокоточные калиброванные наблюдения кривых блеска и построить адекватные теоретические модели. Излагается путь построения теоретической кривой блеска, которая учитывает распределение яркости на краю солнечного диска, в частности в хромосфере за пределами видимого диска Солнца, а также неровности рельефа на краю лунного диска. Оценен эффект дифракции солнечного излучения на краю лунного диска. Изложена процедура построения по данным фотометрических наблюдений затмения 11 августа 1999 г. кривых блеска, калиброванных по блеску целого солнечного диска, с максимальным значением средних квадратичных погрешностей не более 10 %. При определенных допущениях относительно распределения яркости на краю солнечного диска вычислены

*теоретические кривые блеска для каждого из мест наблюдений. Сравнение их с наблюдательными кривыми показывает, что процедуры наблюдений и редуциции результатов в целом неотягощены грубыми ошибками, а процедура построения теоретических кривых блеска затмения в общем правильно учитывает его главные параметры.*

*LIGHT CURVES OF A TOTAL SOLAR ECLIPSE IN PLACES OF ITS PHOTOMETRIC OBSERVATIONS, by Danylevsky V. O. — Total solar eclipse light curves observed with photoelectric photometers can be used to determine the Sun's angular diameter. For this purpose, it is necessary to obtain high-accuracy light curves observed and calibrated and to construct adequate theoretical simulations. We propose a way to construct a theoretical eclipse light curve which takes into account the solar visible disc limb darkening function, brightness distribution of the chromosphere out of the Sun's disc, and Moon's disc limb irregularities. The effect of the Sun's rays diffraction on the lunar disc limb is evaluated. We describe a procedure for the construction of eclipse light curves from 11 August 1999 photometric observational data which are calibrated on the full Sun's disc luminosity, rms errors of the light curves being no more than 10 %. Theoretical light curves are constructed for each observational place under certain assumptions on the solar disc limb darkening function and brightness distribution of the chromosphere out of the disc. A comparison of the theoretical and observational light curves shows that the observational procedure and data reduction are free from crude errors and chief factors are taken into account correctly in our procedure of the construction of theoretical eclipse light curves.*

## ВСТУП

Не так давно увага наукової громадськості була привернута до неординарної події, що спостерігалася 11 серпня 1999 р. на значній частині території Європи та Близького Сходу — повного затемнення Сонця. Однією із задач, для розв'язання яких повне затемнення Сонця надає найсприятливіші можливості, і яка за останні три десятиріччя вже стала традиційною при спостереженнях цих явищ, є визначення діаметра Сонця [1, 26, 29]. Під час затемнення, на відміну від усіх інших методів наземних вимірювань діаметра Сонця, положення краю його видимого диска фіксується відносно позаатмосферного репера — краю місячного диска, а контакт країв цих дисків визначається за зникненням чи появою потоку випромінювання і не залежить від тремтіння та розмивання краю зображення сонячного диска, спричинених оптичними неоднорідностями в атмосфері Землі. Тому очікується, що спостереження повних затемнень дадуть результати, значно менш обтяжені похибками атмосферного походження. Отже, наукова експедиція Київського національного університету імені Тараса Шевченка в Румунії виконала фотометричні спостереження затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. в шести місцях у межах смуги повного затемнення поблизу її північної та південної границь [19]. Очікувана точність визначення кутового діаметра сонячного диска за даними цих спостережень порядку 0.01". Мета цих досліджень — одержати нові дані, за якими можна було б з'ясувати достовірність висновків про змінність діаметра Сонця, наприклад із циклом сонячної активності [31], вікові зміни [26] чи про відсутність таких змін [38].

Як було показано у попередніх роботах, радіус видимого сонячного диска на епоху спостережень затемнення можна визначити як один з параметрів теоретичної кривої блиску сонячного серпа шляхом підгонки її методом найменших квадратів до кривої блиску, одержаної зі спостережень

[9, 22]. Обернена задача зі знаходження кутового радіуса сонячного диска за зазначеними фотометричними кривими блиску затемнення належить до класу некоректно поставлених, у яких похибка результату розв'язку може дуже залежати від похибок спостережних даних [7]. Отже, щоб досягнути максимальної точності у визначенні діаметра Сонця за спостереженнями його затемнень, необхідно з максимальною точністю як одержати криві блиску сонячного серпа зі спостережень, так і обчислити їхню теоретичну модель. Метою пропонованої статті є, по-перше — показати детально шлях побудови теоретичної кривої блиску затемнення для даного місця спостережень та одержати оцінки для початкових значень її параметрів, по-друге — показати шлях побудови за даними фотометричних спостережень затемнення 11 серпня 1999 р. [19] кривих блиску для кожного з місць спостережень та оцінити їхні похибки, і по-третє, з порівняння одержаних кривих блиску та їхніх теоретичних моделей оцінити справедливість припущень щодо параметрів затемнення.

#### ТЕОРЕТИЧНА КРИВА БЛИСКУ ЗАТЕМНЕННЯ

Кривою блиску затемнення називатимемо залежність від часу вихідного сигналу фотометра, що реєструє у місці спостережень потік випромінювання від сонячного серпа та корони, і яка у загальному випадку описується формулою

$$F(t) = \frac{1}{D^2(t)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) p(\lambda, t) [J_{\text{cp}}(\lambda, t) + J_{\text{кр}}(\lambda)] d\lambda. \quad (1)$$

Тут  $D(t)$  — відстань від місця спостережень до Сонця на час  $t$ ,  $S(\lambda)$  — спектральна чутливість фотометра;  $p(\lambda, t)$  — прозорість земної атмосфери у місці спостережень на час затемнення;  $J_{\text{cp}}(\lambda, t)$ ,  $J_{\text{кр}}(\lambda)$  — блиск сонячного серпа та корони відповідно (блиск корони можна вважати сталим протягом затемнення);  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — межі спектральної чутливості фотометра. Якщо є можливість визначити сигнал фотометра від цілого сонячного диска на час затемнення у місці спостережень, як це зокрема було під час затемнення 11 серпня 1999 р. [19], то можна прокалібрувати криві блиску за блиском цілого сонячного диска. Тоді крива блиску затемнення буде відображати лише зміну з часом блиску сонячного серпа та корони в одиницях блиску цілого сонячного диска:

$$J_{\text{зт}}(t, \lambda_{\text{еф}}) = J_{\text{cp}}(t, \lambda_{\text{еф}}) + J_{\text{кр}}(\lambda_{\text{еф}}). \quad (2)$$

Тут  $\lambda_{\text{еф}}$  — ефективна довжина хвилі випромінювання Сонця для спектральної характеристики чутливості даного фотометра та спектральної прозорості атмосфери у місці спостережень. У подальшому буде розглядатися саме така нормована крива блиску.

З розгляду проекції видимих дисків Сонця й Місяця на картинну площину (рис. 1, а) випливає, що блиск сонячного серпа (в одиницях блиску цілого сонячного диска при ефективній довжині хвилі випромінювання  $\lambda$ ) на довільний момент часу  $t$  може бути обчислений як

$$J_{\text{cp}}(\lambda, t) = \int_{\theta_1(t)}^{\theta_2(t)} \int_{R_M(t) - \Delta(t)}^{R_S(t)} I_{\text{сл}}(\lambda, \theta, r) r dr d\theta d\lambda, \quad (3)$$

де  $\theta_1(t)$ ,  $\theta_2(t)$  — позиційні кути (при центрі сонячного диска) точок перетину лімба видимого сонячного диска з лімбом середнього видимого диска Місяця;  $R_S(t)$ ,  $R_M(t)$  — топоцентричні радіуси видимих дисків Сонця

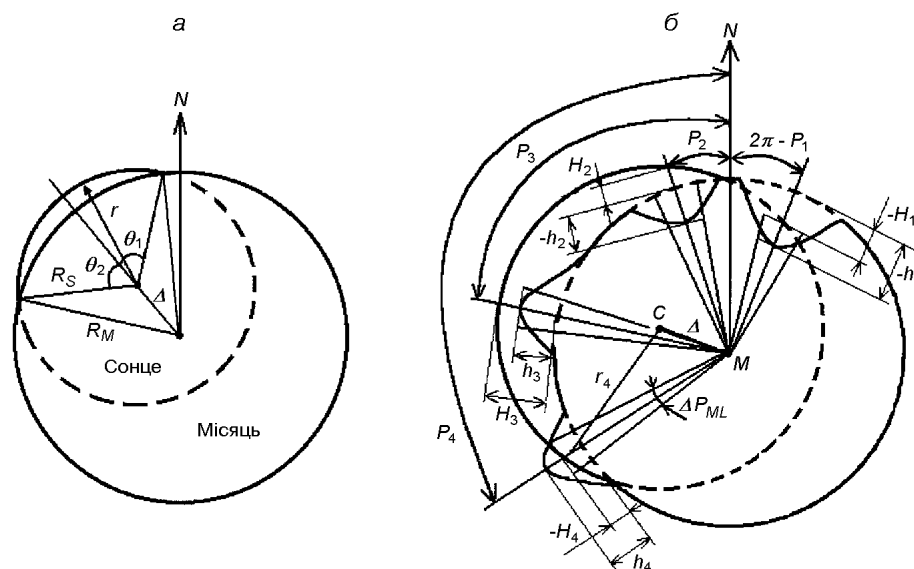


Рис. 1. До обчислень блиску сонячного серпа: *a* — серп, утворений диском умовної сферичної поверхні Місяця з середнім радіусом  $R_M$ ; *б* — обчислення поправок за нерівності рельєфу на краю місячного диска при різних співвідношеннях між параметрами  $h_k$  і  $H_k$  (див. текст). Координата  $r_k$  точки на сонячному диску відносно його центра  $C$  обчислюється для кожного значення радіальної координати відносно центра місячного диска  $M$  за відомими на кожен момент часу радіусами видимих дисків  $R_S$  та  $R_M$ , відстанню між їхніми центрами  $\Delta$ , величинами  $h_k$  і  $H_k$  та позиційним кутом при центрі місячного диска  $P_k$ . Поправка до блиску сонячного серпа додатня при  $k = 1$  і  $2$ , від'ємна при  $k = 3$  і  $4$

та Місяця;  $\Delta(t)$  — кутова відстань між центрами видимих дисків Сонця та Місяця на момент спостережень  $t$ ;  $I_{cl}(\lambda, \theta, r)$  — функція розподілу інтенсивності монохроматичного випромінювання Сонця вздовж радіуса на його лімбі відносно центра диска (функція потемніння сонячного диска до краю). Якщо ця функція сферично-симетрична, то при сферичному Місяці, без врахування рельєфу на його краю, блиск сонячного серпа може бути обчислений за формулою, вперше одержаною Копалом [28] та використаною, зокрема, для редукції фотометричних спостережень повних затемнень Сонця 9 травня 1948 р. та 25 лютого 1952 р. [34, 35]:

$$J_{cp}(\lambda, t) = \int_{R_M(t) - \Delta(t)}^{R_S(t)} I_{cl}(\lambda, r) 2r \arccos \left[ \frac{R_M^2(t) - r^2 - \Delta^2(t)}{2r\Delta(t)} \right] dr. \quad (4)$$

Функцію  $I_{cl}(\lambda, r)$  у принципі можна обчислити, використовуючи апроксимацію даних вимірювань яскравості вздовж радіуса сонячного диска, одержану для спектрального континууму оптичного випромінювання Сонця [14], або ж для інтегрального у всьому оптичному діапазоні спектру його випромінювання [17]. Зазначені апроксимації побудовані у припущенні, що залежність функції джерела від оптичної глибини у сонячній атмосфері подається за допомогою інтегральних показникових функцій. При цьому розподіл яскравості по сонячному диску є функцією косинуса  $\mu(r)$  кута між напрямками лінії зору спостерігача та нормалі до сонячної поверхні у точці сонячного диска з координатою  $r$ . Для визначення параметрів зазначених апроксимацій використані найновіші дані вимірювань розподілу яскравості по сонячному диску, що враховують, зокрема, покривний ефект від фраун-

гоферових ліній, а також результати найновіших вимірювань розподілу енергії у спектрі Сонця [5, 6]. Однак зазначені вище ряди даних вимірювань розподілу яскравості не охоплюють ділянку диска поблизу його краю, де  $\mu < 0.15$ . Що ж до розподілу яскравості сонячного диска на самому краю, то незначна кількість даних була одержана у окремих вузьких ділянках неперервного спектру і у фраунгоферових лініях зі спектроскопічних спостережень повних затемнень Сонця [20, 23, 30]. Ці спостереження виявили світіння хромосфери за межами видимого сонячного диска як у частотах фраунгоферових ліній, так і у неперервному спектрі, причому різниця розподілів яскравості у неперервному спектрі та у лініях досить велика. Проте зазначені вимірювання охоплюють лише незначну ділянку радіуса сонячного диска поблизу  $\mu = 0$ . Крім того, оскільки зазначені спостереження затемнень Сонця та теоретичні дослідження показують, що градієнт інтенсивності випромінювання на межі між фотосферою та хромосферою великий, але не нескінченний, то розподіл яскравості на самому краю видимого сонячного диска повинен бути неперервною функцією радіуса як при  $r \leq R$ , так і при  $r > R$ , а отже, його апроксимація за допомогою зазначених вище функцій від косинуса кута при  $\mu \rightarrow 0$  видається неправомірною. З іншого боку, модельні обчислення яскравості на краю диска в умовах не-ЛТР пов'язані зі значними похибками як через ненадійність самих моделей [27], так і через певну умовність визначення та локалізації шару сонячної атмосфери, який вважається за поверхню Сонця. Отже, задача визначення радіуса Сонця за кривою блиску його затемнення пов'язана з пошуком адекватного опису розподілу інтенсивності випромінювання у найвищих шарах сонячної атмосфери. При цьому повністю знехтувати блиском хромосфери за межами видимого сонячного диска у випадку фотометричних спостережень затемнення у широкому діапазоні спектру, як це було зроблено, наприклад, у роботі [35], видається неправомірним. Як показують оцінки, зроблені лише для найінтенсивніших ліній (зокрема водню, гелію та кальцію) без врахування континууму, безпосередньо перед другим та одразу після третього контакту він приблизно дорівнює блискові корони, а тому може суттєво впливати на криву блиску затемнення перед початком та по закінченні його повної фази [8]. З цієї причини верхня межа інтегрування у (4) повинна бути збільшена щонайменше на висоту нижньої хромосфери ( $\approx 5''$  для відстані 1 а. о.), і відповідно функцію розподілу інтенсивності випромінювання слід також екстраполювати за межі видимого диска на зазначену величину. За даними спостережень затемнень Сонця, яскравість хромосфери за межами його видимого диска як у лініях, так і у неперервному спектрі може бути апроксимована сумою експоненціальних функцій за аргументом відстані від краю сонячного диска [20].

Зі спостережень затемнень Сонця також відомо, що безпосередньо перед другим контактом та після третього сонячний серп складається з окремих смужок (чіток Бейлі), утворених сонячним диском, що просвічується через нерівності рельєфу на краю місячного диска, спроектованих на нього. Тому очевидно, що й з цієї причини реальна крива блиску сонячного серпа також помітно відрізняється від обчисленої за формулою Копала (4). Для врахування впливу фігури та топографії Місяця поблизу краю його видимого диска на криву блиску затемнення зручно було б у формулах (3) і (4) ввести його радіус як функцію, наприклад, позиційного кута даної точки лімба при центрі диска. Проте аналітичної форми такої функції на жаль не існує, а використання різного роду апроксимацій типу сферичних гармонік, навіть до 90-го порядку [21], навряд чи розв'яже проблему. Значно практичнішим видається використання карт Ватса край-

ової зони Місяця [39]. Ці карти подають поправки до радіуса проекції на небесну сферу умовної поверхні Місяця для його середньої геоцентричної відстані як функцію позиційного кута на місячному лімбі з кроком  $0.2^\circ$ . Поки що це найповніше джерело даних про профіль місячного лімба. Ці карти добре вивчені, для них зроблені оцінки похибок висот рельєфу на лімбі залежно від лібрацій, вони поступово доповнюються і уточнюються за даними спостережень покрить зір Місяцем. Зокрема, дані спостережень покрить зір Місяцем залучаються для визначення положення центра видимого диска Місяця відносно положення проекції центра його маси на видимий диск для дати спостережень, оскільки геоцентричні координати Місяця обчислюються за теоріями руху для центра його маси, тоді як явища покриття та затемнень спостерігаються відносно видимого диска [25, 29, 33]. З часом карти Ватса можуть також бути доповнені й даними про топографію місячної поверхні, одержаної сучасними методами наземної радарної інтерферометрії [32], за допомогою космічного апарата «Клементіна» [37] та хронометрування покриття Місяцем космічного апарата «Лунар Проспектор» [21]. Це дозволить уточнити вже одержані раніше за спостереженнями сонячних затемнень значення діаметра Сонця [26, 29]. Тут до блиску сонячного серпа, утвореного лімбом сферичного Місяця з середнім радіусом видимого диска  $R_M(t)$  і обчисленого за формулою Копала (з відповідно уточненою верхньою межею інтегрування), додається окремо обчислена поправка (див. також [35]):

$$\Delta J_{\text{cp}} = \sum_{k=1}^{N(t)} J_k. \quad (5)$$

Тут  $J_k$  — блиск ділянки сонячного диска, яка або відкривається заглибленням на лімбі місячного диска відносно лінії поверхні його середнього радіуса (тоді  $J_k$  додатний), або ж закривається випуклістю ( $J_k$  від'ємний), у межах елементарного сектора, кут розкриття якого при центрі місячного диска  $\Delta P_{\text{ML}}$  дорівнює вибраному крокові зміни позиційного кута (рис. 1, б);  $N(t)$  — кількість елементарних секторів у межах сонячного серпа для певного моменту часу (або ж фази затемнення). У загальному випадку

$$J_k = \Delta P_{\text{ML}} \int_{L_{1k}}^{L_{2k}} I_{\text{SL}}(r_M) r_M dr_M, \quad (6)$$

де  $I_{\text{SL}}(r_M)$  — інтенсивність випромінювання поблизу лімба сонячного диска у точці з координатою  $r_M$  відносно центра місячного диска, для якої обчислюється відповідне значення координати відносно центра сонячного диска за відомою на кожен момент часу відстанню між центрами дисків; межі інтегрування  $L_{1k}$  та  $L_{2k}$  залежать від співвідношення між поправкою до середнього радіуса диска Місяця  $h_k$ , яка знаходиться за картами Ватса, та висотою над ним краю сонячного диска  $H_k$  при даному позиційному куті  $P_k$  (на рис. 1, б показані головні випадки таких співвідношень). Зазначена величина залежить також від лібрацій Місяця на час затемнення, тобто є функцією часу.

Нарешті, окремими дослідниками [1, 30] дискутується вплив на результати спостережень затемнень Сонця дифракції сонячного випромінювання на краю диска Місяця, і зокрема на визначення розподілу яскравості на краю сонячного диска. Деякі автори навіть інтерпретують зареєстровані ними варіації вихідного сигналу фотодетекторів до і після повної фази затемнення Сонця саме як прояви дифракції [36]. У нашому випадку вплив зазначеного явища дифракції на криву блиску затемнення незадовго до другого та одразу після третього контактів можна наближено врахувати,

якщо вважати край місячного диска нескінченно тонким та прямим у межах сонячного серпа. Тоді підінтегральну функцію у (4) треба просто домножити на дифракційну функцію Френеля [7]:

$$Fr(X) = \frac{1}{8} \{ [1 + 2S(X)]^2 + [1 + 2C(X)]^2 \}, \quad (7)$$

де  $S(X)$ ,  $C(X)$  — інтеграли Френеля, аргумент  $X$  для яких у нашому випадку обчислюється як функція радіальної координати на сонячному диску в межах серпа:

$$X(r) = \sqrt{\frac{2D_M}{\lambda_{\text{эф}}}} \operatorname{tg} \left[ \pi \frac{r - R_M + \Delta(t)}{180} \right]. \quad (8)$$

Тут  $r$ ,  $R_M$  і  $\Delta(t)$  — ті ж, що й у (4), в радіанах, а  $D_M$  — топоцентрична відстань до Місяця.

Слід також відзначити, що кутова топоцентрична відстань між центрами видимих дисків Сонця та Місяця на момент спостережень  $\Delta(t)$ , що входить до формули кривої блиску (1), тут визначається за відомою зі сферичної астрономії формулою

$$\cos \Delta(t) = \sin \delta_S(t) \sin \delta_M(t) + \cos \delta_S(t) \cos \delta_M(t) \cos(\alpha_S(t) - \alpha_M(t)), \quad (9)$$

де топоцентричні координати Сонця й Місяця  $\delta_S(t)$ ,  $\delta_M(t)$ ,  $\alpha_S(t)$ ,  $\alpha_M(t)$ , а також величини  $D(t)$ ,  $R_S(t)$ ,  $R_M(t)$  обчислюються на час спостережень за фундаментальними ефемеридами DE200/LE200. Тому, оскільки залежність цих параметрів від часу визначається обертанням і орбітальним рухом Землі та Місяця, точність їхніх обчислень залежить від точності визначення координат місця та хронометрування даних спостережень. Також зміна атмосферної маси внаслідок видимого добового руху Сонця і залежність від часу прозорості земної атмосфери  $p(\lambda, t)$  у місці спостережень протягом дня змушують визначати для кожного із зазначених місць ці параметри на час затемнення. І нарешті, у формулах (1) і (2), що описують теоретичну криву блиску затемнення, блиск корони (або її частини в межах поля зору фотометра) може вважатися сталою величиною, яка визначається за сигналом фотометра під час повної фази затемнення.

Як видно із зазначеного вище, модель кривої блиску залежить від багатьох параметрів, і результат підгонки даної моделі до кривої блиску, одержаної зі спостережень, залежить від точності визначення цих параметрів, причому деякі з них повинні бути визначені під час спостережень. Зокрема це було передбачено у процедурі спостережень затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. [19].

#### ПОБУДОВА КРИВИХ БЛИСКУ ЗАТЕМНЕННЯ 11 СЕРПНЯ 1999 Р. ЗА ДАНИМИ ФОТОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Обладнання і процедура спостережень зазначеного затемнення експедицією Київського національного університету в Румунії, а також одержані результати описано у роботі [19]. Тут достатньо лише зазначити, що дані спостережень були одержані у вигляді фонограм, тобто записаних на паралельних доріжках магнітних плівок як сигналів звукових частот від фотометра, так і хронометруючих сигналів. З метою калібрування кривих блиску сонячного серпа у кожному з місць спостережень були також зареєстровані фонограми блиску цілого сонячного диска при кількох (6—10) зенітних відстанях Сонця до першого та після четвертого контактів.

Для подальшої роботи з даними спостережень, за допомогою спеціального обладнання, описаного в роботі [8], відповідно удосконаленим для

зниження шуму в каналі передачі сигналу від фотометра та підвищення точності хронометрування даних, зазначені фонограми були перетворенні у цифрові файли, придатні для обробки з ЕОМ. Відповідно складені комп'ютерні програми також дозволяють усереднювати частоту сигналу фотометра на інтервалах часу від 0.01 с до 1.0 с, з віднесенням до UTC середин зазначених інтервалів, тобто знаходити її за принципом цифрового частотоміра. Таким чином, якщо коефіцієнти чутливості фотометрів у всьому їхньому динамічному діапазоні відомі, то за одержаними під час спостережень фонограмами можна для кожного з місць спостережень побудувати криві блиску затемнення, що описуються формулою (3). Якщо аналогічну формулу записати для сигналу фотометра від цілого сонячного диска, знехтувавши блиском корони, то процедура калібрування кривої блиску затемнення за блиском цілого сонячного диска для ефективної довжини хвилі  $\lambda_{\text{еф}}$  буде описуватися співвідношенням

$$\frac{F_{\text{сп}}(t)}{F_{\text{с}}(t)} = \frac{1}{D^2(t)} S(\lambda_{\text{еф}}) p(\lambda_{\text{еф}}, t) (\lambda_2 - \lambda_1) \times \frac{\int_{\theta(t)}^{\theta(t)} \int_{R_{\text{M}}(t)-\Delta(t)}^{R_{\text{S}}(t)} I(\lambda_{\text{еф}}, \theta, r) r d\theta dr + J_{\text{кр}}(\lambda_{\text{еф}})}{\frac{1}{D^2(t)} S(\lambda_{\text{еф}}) p(\lambda_{\text{еф}}, t) (\lambda_2 - \lambda_1) \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\text{S}}} I(\lambda_{\text{еф}}, \theta, r) r d\theta dr}, \quad (10)$$

де  $S(\lambda_{\text{еф}})$  — коефіцієнт чутливості фотометра,  $p(\lambda_{\text{еф}})$  — прозорість земної атмосфери у місці спостережень на час затемнення, визначена за результатами реєстрації блиску цілого сонячного диска. У наведеному співвідношенні лише параметр  $D(t)$  виключається практично повністю (бо відстань від Землі до Сонця майже не змінюється протягом декількох годин), а інші зазначені параметри у більшій чи меншій мірі залежать від точності, з якою вони визначені для кожного фотометра, або задані конструктивно, або ж знайдені зі спостережень. Тому формальне виключення спектрального діапазону та коефіцієнта чутливості фотометра, а також прозорості атмосфери при калібруванні кривої блиску затемнення не позбавляє її повністю від впливу похибок, пов'язаних з цими параметрами.

Коефіцієнт чутливості фотометра може бути повністю виключеним з кривої блиску затемнення лише якщо він не залежить від потоку випромінювання на фоточутливій поверхні фотодіода у діапазоні між потоками випромінювання від цілого диска Сонця та від корони під час повної фази затемнення, відношення яких може перевищувати  $10^6$  [2]. Тому задля підвищення точності фотометрична шкала кожного з фотометрів була проградуїрована у всьому динамічному діапазоні в умовних одиницях освітленості, і криві блиску затемнення для кожного з місць спостережень були побудовані в цих же одиницях. Динамічний діапазон чутливості кожного з фотометрів складає приблизно  $5 \cdot 10^6$  і розбитий на три піддіапазони [4]. Середні квадратичні похибки градуювання на цих піддіапазонах становлять відповідно 3 %, 3—4 % і 4—6.5 % для кожного з шести фотометрів.

Також були перенесені у цифрові файли та усереднені на відповідних проміжках часу фонограми блиску цілого сонячного диска, і за проградуїованими фотометричними шкалами фотометрів були знайдені освітленості у зазначених вище умовних одиницях для кількох моментів часу як до, так і після затемнення. За цими даними у кожному з місць спостережень були побудовані емпіричні залежності такої освітленості від цілого сонячного диска від часу (або ж від зенітної відстані), що дозволило проінтерполювати



її на будь-який момент затемнення. Така інтерполяція на час реєстрації кривої блиску затемнення була виконана за відомим законом Бугера ослаблення випромінювання Сонця в атмосфері Землі для ефективної довжини хвилі сонячного випромінювання. Параметрами інтерполяції тут були спектральна освітленість фотоприймача за відсутності земної атмосфери, та прозорість атмосфери у напрямі на zenit, усереднена протягом всього часу, що охоплює як перебіг затемнення у даному місці, так і реєстрацію блиску цілого сонячного диска. Значення цих параметрів, знайдені для кожного з місць спостережень методом найменших квадратів за зазначеними вище зареєстрованими освітленостями від цілого сонячного диска, наведені у таблиці. Ефективні довжини хвиль сонячного випромінювання, яким відповідають вихідні сигнали кожного з фотометрів, були знайдені для спектрального розподілу енергетичної освітленості Сонцем верхньої межі земної атмосфери, усередненого спектрального коефіцієнта пропускання земної атмосфери [2] та для індивідуальних відносних спектральних характеристик чутливості фотометрів. Такі характеристики були виміряні для кожного з фотометрів у діапазоні спектру  $\lambda\lambda = 0.4...1.05$  мкм за допомогою монохроматора та світловимірювальної лампи з вольфрамовою стрічкою розжарення. Довжини хвиль максимумів зазначених характеристик знаходяться у діапазоні  $\lambda\lambda = 0.700...0.740$  мкм, спектральні ширини на рівні половини від цих максимумів становлять від 0.280 до 0.310 мкм, а відповідні ефективні довжини хвиль сонячного випромінювання, як від цілого диска, так і від серпа у різних місцях спостережень, складають від 0.655 до 0.695 мкм.

На рис. 2 показані залежності освітленості від цілого сонячного диска з часом у місці спостережень, найближчому до південної межі смуги повного затемнення [19]. Тут блиск цілого сонячного диска був зареєстрований при zenitних відстанях  $66^\circ \geq z \geq 32^\circ$ , а zenitна відстань Сонця на момент середини повної фази затемнення  $z \approx 27^\circ$ . Загалом у всіх місцях спостережень реєстрація блиску цілого сонячного диска була виконана при його zenitних відстанях  $67^\circ \geq z \geq 30^\circ$ , а zenitні відстані Сонця на моменти середин повних фаз затемнення  $31.5^\circ \geq z \geq 27^\circ$ . Рис. 2 показує помітні відхилення виміряних у кожному з місць спостережень освітленостей від обчислених за формулою Бугера із зазначеними у таблиці значеннями її параметрів. Ці відхилення зумовлені як зміною прозорості атмосфери поблизу ефективної довжини світлової хвилі випромінювання Сонця, так і зміною самої ефективної довжини світлової хвилі внаслідок змін прозорості атмосфери в окремих вузьких ділянках спектру в межах спектрального діапазону чутливості даного фотометра (ефект Форбса [11]). Також певний внесок у зазначені відхилення вносить і навколосонячний ореол. Внесок потоку випромінювання від ореолу у межах поля зору фотометра (у нашому

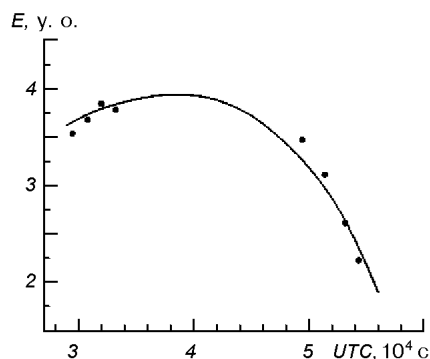


Рис. 2. Зміна блиску цілого сонячного диска з часом біля південної межі смуги затемнення: точки — дані спостережень; крива — інтерполяція за законом Бугера

випадку це приблизно  $3.5^\circ$ ) може складати більше 10 %, а у деяких випадках (за даними піргеліометрії, а також за спеціальними дослідженнями відносної яскравості навколосонячного та навколomisячного ореолів) може навіть перевищувати потік від сонячного диска [10, 15, 18]. Але нескладно показати, що при врахуванні лише однократного розсіяння випромінювання Сонця в атмосфері Землі, що цілком прийнятно при точності 2—3 %, калібрування кривої блиску затемнення за блиском цілого сонячного диска у принципі виключає вплив на неї навколосонячного ореолу. Проте через можливу змінність атмосферної індикатриси розсіяння, пов'язану зі зміною зенітної відстані Сонця та оптичних властивостей атмосфери у місці спостережень затемнення і цілого сонячного диска протягом 4—6 год [12, 16], повністю позбавитися впливу ореолу усе ж неможливо. І нарешті, ще одна складова зазначених відхилень — можлива нестабільність чутливості фотометрів, середня квадратична величина якої, за результатами градування, не може бути меншою за 3 %. Отже, тут вважається, що загалом відхилення вимірних значень освітленості від проінтерпольованих за законом Бугера випадкові, і за середню квадратичну похибку (СКП) освітленості від цілого сонячного диска у місці спостережень, проінтерпольованої на час затемнення, тут вважається середнє квадратичне значення такого відхилення. Для місць фотометричних спостережень затемнення 11 серпня 1999 р. [19] такі похибки становлять 3—5.5 % (таблиця).

Таким чином, калібрування побудованих спостережних кривих блиску було виконано за освітленостями від повного сонячного диска, проінтерпольованими на момент середини повної фази затемнення у відповідному місці спостережень. Підсумкова СКП каліброваної кривої блиску затемнення складається із зазначених вище СКП блиску цілого сонячного диска та з похибок градування фотометричних шкал фотометрів для відповідного піддіапазону їхньої чутливості. Оцінки максимальних СКП на ділянках кривих блиску поблизу та під час фази повного затемнення, одержаних з найвищими коефіцієнтами чутливості фотометрів при найбільших похибках градування фотометричних шкал, складають приблизно 5—8 %. На рис. 3 показані побудовані та прокалібровані зазначеним вище способом криві блиску затемнення для двох місць спостережень поблизу північної межі смуги повного затемнення, разом з їхніми теоретичними моделями, спосіб обчислення яких викладено нижче. Окремі значення спостережних кривих знайдені усередненням на інтервалі у 0.1 с. Зміщення спостережних кривих блиску відносно теоретичних кривих у часі на декілька секунд, що перевищує зазначену вище оцінку похибок хронометрування, свідчить про певні

Значення параметрів  $P$  та  $E$  формули (10) і освітленостей  $E_{\text{ц}}$ , проінтерпольованих на моменти  $UTC_{\text{ц}}$  середин повної фази у місцях спостережень затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. Позначення місць спостережень та ініціали спостерігачів за [19]: Пд1—Пд3 — у південній, Пн1—Пн3 — у північній частині смуги повного затемнення у порядку віддалення від її межі

Місце спостережень	Віддаль від межі смуги, км	$P$	$E_0$	$UTC_{\text{ц}}$ , с	$E_{\text{ц}}$
Пд1	0.1	0.675	61.06	39986.5	$39.33 \pm 3.4 \%$
Пд2	3.0	0.706	76.24	39989.1	$51.10 \pm 3.0 \%$
Пд3	10.0	0.765	78.22	39993.1	$57.73 \pm 3.0 \%$
Пн3	10.0	0.691	80.97	40054.2	$52.68 \pm 3.6 \%$
Пн2	3.0	0.573	85.15	40053.8	$44.29 \pm 4.6 \%$

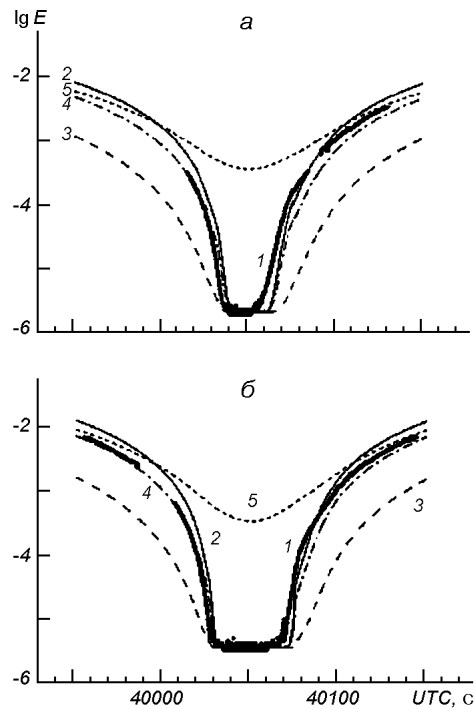


Рис. 3. Криві блиску, одержані у північній частині смуги затемнення 11 серпня 1999 р. при усередненні на інтервалі 0.1 с, разом з їхніми теоретичними моделями: *а* — місце спостереження поблизу північної межі; *б* — місце спостереження, зміщене від північної межі до середини смуги приблизно на 2 км; 1 — дані спостережень, 2 — модель з однорідно яскравим диском Сонця, 3 — розподіл яскравості по сонячному диску за (12) без врахування хромосфери; 4 — те ж саме для розподілу яскравості хромосфери у неперервному спектрі при  $\lambda = 0.67$  мкм [30], 5 — те ж саме для розподілу яскравості хромосфери у лінії  $H_{\alpha}$  [23]

недоліки теоретичних кривих блиску, зокрема пов'язані із врахуванням нерівностей рельєфу на краю місячного диска та зі зміщенням центра видимого диска відносно ефемеридного положення центра мас Місяця, про що йтиметься нижче.

#### ПОРІВНЯННЯ КРИВИХ БЛИСКУ ЗАТЕМНЕННЯ 11 СЕРПНЯ 1999 Р. З ЇХНІМИ ТЕОРЕТИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ

Щоб оцінити, наскільки збігаються спостережувані криві блиску затемнення з їхніми теоретичними моделями, переконалися у відсутності грубих помилок у спостереженнях кривих блиску, а також у теоретичній моделі, останні були обчислені для деяких з місць спостережень. Теоретичні криві блиску затемнення 11 серпня 1999 р. обчислювались згідно з поясненнями п. 1. для кожного з місць спостережень з використанням їхніх координат за [19], а також даних про рельєф на краю місячного диска за картами Ватса з відповідними поправками [24, 25, 33, 39], та при певних припущеннях щодо функції інтенсивності на краю сонячного диска.

Як зазначено вище, процедура побудови теоретичної моделі пов'язана з обчисленнями відносного розташування, руху та орієнтації у просторі Сонця й Місяця. Всі ці обчислення тут зручніше виконувати для небесної сфери, а не для площини Бесселя, як це прийнято в теорії затемнень [13,

25]. У обчислювальній процедурі видимі сферичні геоцентричні координати для Сонця інтерполюються за даними, наведеними у [3], за допомогою формули Бесселя, а для Місяця — за допомогою поліномів Чебишева. У геоцентричні координати центра мас Місяця, обчислені таким чином, внесені також зазначені вище поправки для визначення координат центра його видимого диска. Ці поправки загалом залежать від лібрацій Місяця і обчислюються на час повної фази геоцентричного затемнення разом з іншими його обставинами [24]. Топоцентричні ж координати центрів видимих дисків Сонця й Місяця обчислюються за строгими формулами врахування добового паралаксу світил, з перетворенням геодезичних координат місць спостережень, визначених за допомогою GPS, у геоцентричні за параметрами еліпсоїда WGS84 [25].

Процедура обчислень теоретичної кривої блиску розпочиналася з визначення моменту максимального зближення видимих у даному місці спостережень дисків Сонця й Місяця шляхом мінімізації відстані між центрами їхніх видимих дисків, що обчислюється за допомогою формули (9), протягом доби дати затемнення. Цей момент є також і моментом середини повної фази затемнення Сонця, знайденим без врахування нерівностей рельєфу на краю місячного диска (згідно з термінологією [24, 25] це момент максимального затемнення). Саме для цього моменту обчислювались лібрації Місяця у довготі й широті та знаходились поправки до його середнього радіуса за нерівності рельєфу на краю видимого диска. Далі власне крива блиску обчислювалась на проміжку часу, що охоплював повну фазу затемнення для даного місця спостережень і приблизно дорівнював тривалості фотометричної реєстрації перебігу затемнення у цьому місці. Для кожного з заданого ряду моментів часу  $t$  за (9) обчислювалась кутова відстань  $\Delta(t)$  між центрами видимих дисків Сонця й Місяця, а також, за відповідними формулами, і їхні середні радіуси. Далі, для картинної площини, у наближенні плоскої геометрії, обчислювались позиційний кут лінії центрів  $P_\Delta$  та позиційні кути  $\theta_1$  і  $\theta_2$  при центрі місячного диска точок перетину лімбів дисків Сонця й Місяця, що визначають довжину сонячного серпа (рис. 1, а). За цими даними теоретична крива блиску тут обчислюється за формулою, що є комбінацією формул (4) та (6):

$$J_C(\lambda, t) = \frac{B_0(\lambda)}{\pi R_S^2(t) B_m(\lambda)} \left\{ \int_{R_M(t) - \Delta(t)}^{R_S(t) + H_{xp}} b(\lambda, r) 2r \arccos \left[ \frac{R_M^2(t) - r^2 - \Delta^2(t)}{2r\Delta(t)} \right] dr + \sum_{k=1}^{N(t)} \Delta P_{ML, k} \int_{R_M}^{R_M + h_k} b(\lambda, r) r_M dr \right\} + J_{кр}, \quad (11)$$

де  $B_0(\lambda)$ ,  $B_m(\lambda)$  — яскравість сонячного диска у його центрі та середня по диску відповідно;  $N(t)$  — число елементарних секторів, на які розділено сонячний серп на момент часу  $t$ ;  $\Delta P_{ML, k}$  — кутова ширина  $k$ -го елементарного сектора,  $h_k$  — поправка до середнього радіуса диска Місяця за нерівності рельєфу на його краю для цього сектора (рис. 1, б);  $\lambda$  — ефективна довжина хвилі випромінювання Сонця;  $H_{xp}$  — висота хромосфери за межами видимого диска Сонця;  $J_{кр}$  — блиск корони у межах поля зору фотометра, знайдений за спостережною кривою блиску як її середнє під час повної фази затемнення. Однак остаточний вигляд теоретичної кривої блиску одержується з (11) залежно від прийнятої функції розподілу яскравості на краю сонячного диска  $b(\lambda, r)$ . Так, крива 2 на рис. 3 одержана для рівномірно яскравого сонячного диска при  $B_0(\lambda) = B_m(\lambda)$ , без врахування блиску хромосфери за його краєм, тобто  $b(\lambda, r) = 1$  при  $r \leq R_S$ ,  $b(\lambda, r) = 0$

при  $r > R_S$  (тут і далі прийнято  $R_S = 959.63''$ ). Крива 3 обчислена також без врахування блиску хромосфери за краєм видимого диска, але у припущенні, що при  $r \leq R_S$  розподіл яскравості апроксимується зазначеною вище функцією, параметри якої визначені у [17] за даними вимірювань, виконаними багатьма авторами та проінтегрованими у всьому оптичному діапазоні сонячного спектру. Вона достатньо точно імітує розподіл спектральної яскравості при довжині хвилі випромінювання  $\lambda = 0.665$  мкм, близькій до знайденої у нашому випадку ефективної довжини хвилі випромінювання Сонця. Тут також вважається, що ця апроксимація справедлива й для  $\mu \rightarrow 0$ , незважаючи на зроблені вище застереження, оскільки ці обчислення виконуються лише для оцінок методик побудови спостережних та теоретичних кривих блиску. Отже, тут для врахування розподілу яскравості на краю сонячного диска і за його межами може бути використана загальна формула

$$b(r) = \begin{cases} u + \mu(r) \left[ 1 - u + v \ln 2 - v \ln \left( 1 + \frac{1}{\mu(r)} \right) \right], & r < R_S, \\ (u - C_1) e^{-C_1(r - R_S)} + C_1 e^{-C_2(r - R_S)}, & r \geq R_S, \end{cases} \quad (12)$$

де  $u$  та  $v$  — параметри, знайдені у [17];  $\mu(r) = \sqrt{1 - (r/R_S)^2}$ . Оскільки при спостереженнях затемнення 1999 р. фотометри одночасно реєстрували випромінювання сонячного серпа як у неперервному спектрі, так і у фраунгоферових лініях з доволі великою інтенсивністю, зокрема в лінії  $H_\alpha$ , то за (11) і (12) були обчислені криві блиску для обох цих випадків (криві 4 і 5 на рис. 3). При цьому параметри  $C_1$  і  $C_2$  були визначені шляхом підгонки функції (11) за методом найменших квадратів до емпіричного розподілу яскравості на краю сонячного диска, одержаного зі спектроскопічної реєстрації спектрів спалахів під час повних затемнень Сонця для неперервного спектру [30] та лінії  $H_\alpha$  [23]. Видно, що найкраще спостережні криві блиску відтворюються їхніми теоретичними моделями, обчисленими з врахуванням розподілу (12), коефіцієнти якого знайдені за емпіричними даними [30] для неперервного спектру  $\lambda = 0.669$  мкм (крива 4). Зміщення у часі між спостережними теоретичними кривими блиску може бути пояснене як похибками зв'язки шкали часу фотометрів зі шкалою UTC, так і похибками врахування нерівностей на краю місячного диска та зміщення центра видимого диска відносно проекції на нього центра маси Місяця. Найвірогідніше, що з нерівностями рельєфу на краю місячного диска також пов'язана асиметрія зазначених кривих блиску, помітніша для кривої, зареєстрованої ближче до краю смуги повного затемнення (рис. 3, а).

Оцінка впливу дифракції сонячного випромінювання на краю місячного диска на криву блиску була зроблена за формулами (7) та (8) для рівномірно яскравого сонячного диска при сферичному Місяці. За таких умов цей вплив мав бути максимальним. Але у нашому випадку на відрізках часу, що охоплюють одержані тут криві блиску, збурення теоретичних кривих блиску не перевищили 1 %, що збігається з результатом [30]. На спостережні криві блиску цей вплив мусить бути ще меншим через потемніння сонячного диска до краю, немонохроматичність реєстрованого фотометрами випромінювання, непрямолінійність краю місячного диска та значну ширину сонячного серпа. Отже, за вказаних вище оцінок похибок кривих блиску затемнення, побудованих у нашій роботі за спостереженнями 11 серпня 1999 р., впливом дифракції у теоретичній моделі можна знехтувати, тим більше, що на зазначених кривих блиску збурення, схожі на знайдені у роботі [37], не спостерігаються.

## ВИСНОВКИ

Можна зазначити, що використані для спостережень затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. обладнання та процедури забезпечили побудову кривих блиску, каліброваних в одиницях блиску цілого сонячного диска, з сумарною середньою квадратичною похибкою, що не перевищує 10 %. Одержані зі спостережень криві блиску затемнення загалом узгоджуються з теоретичними кривими блиску, шлях побудови яких викладений у пропонованій статті.

З порівняння теоретичних кривих блиску зі спостережними випливає, що процедури спостережень та редукції результатів загалом не обтяжені грубими помилками, а процедура побудови теоретичних кривих блиску затемнення правильно враховує головні параметри затемнення. Отже, зазначена модель може бути використана у подальшому для знаходження радіуса сонячного диска методом найменших квадратів за одержаними зі спостережень кривими блиску затемнення.

Автор висловлює подяку О. К. Осипову, Ю. Г. Бабенкові, О. Я. Вертиполохові за дискусії та критичні зауваження; М. Буромському за допомогу при обчисленнях, О. С. Бенюху, О. Рожиліві, Ю. Таранусі та С. Камінському за допомогу при вимірюваннях характеристик фотометрів.

1. Акимов Л. А., Белкина И. Л., Дятел Н. П., Марченко Г. П. Радиус Солнца по наблюдениям полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 3.—С. 3—7.
2. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—444 с.
3. *Астрономический Ежегодник на 1999 г.* — Санкт-Петербург, 1998.
4. Буздуган Ю. О., Окулов С. М., Клецонок В. В. Экспедиционный фотометр для спостережень сонячного затемнення // Вісн. Київ. ун-ту. Фіз.-мат. науки.—1992.—№ 6.—С. 92—95.
5. Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Матвеев Ю. Б. Новые измерения солнечного спектра в абсолютных энергетических единицах в спектральной области 650—1070 нм // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 3.—С. 75—91.
6. Бурлов-Васильев К. А., Гуртовенко Э. А., Матвеев Ю. Б. Новый ряд данных об абсолютном спектральном распределении энергии солнечного излучения в области 310—685 нм // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 3.—С. 3—32.
7. Гончарский А. В., Черепашук А. М., Ягола А. Г. Некорректные задачи астрофизики. — М.: Наука, 1985.—352 с.
8. Данилевський В. О. Обробка даних фотоелектричних спостережень та аналіз кривих блиску повного сонячного затемнення 11 липня 1991 року // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія.—1999.—Вип. 35.—С. 51—59.
9. Данилевський В. О. Попередні результати визначення діаметра Сонця за даними спостережень сонячного затемнення 11 липня 1991 року // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія.—1999.—Вип. 35.—С. 59—65.
10. Кмито А. А., Склярів Ю. А. Пиргелиометрия. — Л.: Гидрометиздат, 1981.—144 с.
11. Курс астрофизики и звездной астрономии / По ред. А. А. Михайлова. — М.: Наука, 1973.—Том 1.—608 с.
12. Лившиц Г. Ш. Рассеяние света в атмосфере // Тр. астрофиз. ин-та АН КазССР.—1965.—Вып. 6.
13. Лукашова М. В. Предвычисление солнечных и лунных затмений и прохождений планет по диску Солнца. — Санкт-Петербург, 1996.—63 с.—(Препринт ИТА, № 54).
14. Макарова Е. А., Рощина Е. М., Сарычев А. П. Аппроксимация потемнения солнечного диска к краю в континууме в спектральной области 0.3—2.4 мкм // Кинематика и физика небес. тел.—1990.—6, № 6.—С. 21—26.
15. Пяковская-Фесенкова Е. В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. — М.: Наука, 1957.—220 с.
16. Пяковская-Фесенкова Е. В. Об определении коэффициента прозрачности и степени оптической устойчивости земной атмосферы // Атмосферная оптика / Под ред. Н. Б. Дивари. — М.: Наука, 1968.—С. 159—166.
17. Сарычев А. П., Рощина Е. М. Потемнение солнечного диска к краю в полном излучении // Астрон. вестник.—1999.—33, № 1.—С. 90—93.

18. *Ситник Г. Ф.* Исследование земной атмосферы по ореолам Солнца и Луны. — М.: Изд-во МГУ, 1985.—116 с.
19. *Тельнюк-Адамчук В. В., Єфіменко В. М., Данилевський В. О. та ін.* Спостереження повного сонячного затемнення 11 серпня 1999 року науковою експедицією Київського університету // Вісник Київського ун-ту. Астрономія.—2000.—Вип. 36.—С. 41—47.
20. *Томас Р., Атей Р.* Физика солнечной хромосферы. — М.: Мир, 1965.—528 с.
21. *Asmar S. W., Schubert G., Konopliv A. S., et al.* Improving on the high latitude topography of the Moon via precise timing of the Lunar Prospector radio occultations // 31<sup>st</sup> Annual Meeting of the DPS.—1999.—Poster N 18.03.
22. *Danylevsky V. O.* The solar diameter determination from data of the 1991 July 11 solar eclipse photoelectric observation // Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso.—1999.—28, N 3.—P. 201—209.—(Proc. of the 1999 solar eclipse workshop).
23. *Dunn R. B., Evans J. W., Jefferies J. T., et al.* The Chromospheric spectrum at the 1962 Eclipse // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1968.—15.—P. 275—458.
24. *Espenak F., Anderson J.* Total Solar Eclipse of 1999 August 11 // NASA Ref. Publ.—1997.—N 1398.—150 p.
25. *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac / Ed. by P. K. Seidelmann.* — Mill Vally, California,—1992.—752 p.
26. *Fiala A. D., Dunham D. W., Sofia S.* Variation of the solar diameter from solar eclipse observations, 1715—1991 // Solar Phys.—1994.—152, N 1.—P. 97—104.
27. *Heinzel P.* Models of the solar atmosphere // NATO Sci. Ser: Advances in solar research at eclipse from ground and from space / Eds J.-P. Zhan, M. Stavinschi.—2000.—558.—P. 201—220.
28. *Kopal Z.* The distribution of brightness at the extreme limb of the Sun // Astrophys. J.—1946.—104, N 1.—P. 60—74.
29. *Kubo Y.* Position and radius of the Sun determined by solar eclipses in combination with lunar occultations // Publ. Astron. Soc. Jap.—1993.—45.—P. 819—829.
30. *Kurokawa H., Nakayama K., Tsubaki T., Kanno M.* The continuum of the extreme limb and the chromosphere at the 1970 eclipse // Solar Phys.—1974.—36, N 1.—P. 69—79.
31. *Laclare F., Delmas C., Coin J. R., Irbah A.* Measurements and variations of the solar diameter // Solar Phys.—1996.—166.—P. 211—229.
32. *Margot J. L., Campbell D. B., Jurgens R. F., et al.* The topography of the lunar polar regions from Earth-based radar interferometry // 29<sup>th</sup> Annual lunar and planetary science conference, March 16—20, 1998, Huston, TX. — Huston, 1998.—Abstract N 1845.
33. *Morrison L. V., Appleby G. M.* Analysis of lunar occultations. — III. Systematic corrections to Watt's limb-profiles for the Moon // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1981.—196.—P. 1013—1020.
34. *Osawa K.* Distribution of the brightness of the extreme limb of the Sun observed at the solar eclipse on May 9, 1948 // Ann. Tokyo Astron. Observ.—1951.—3, N 2.—P. 52—85.
35. *Rubin V. C.* Solar limb darkening determined from eclipse observations // Astrophys. J.—1959.—129.—P. 812—825.
36. *Shelke Rajendra N., Ingole Vijay T.* Photo-electric observations of shadowbands during 1995 total solar eclipse from Neem ka thana (India) // Bull. Astron. Soc. India.—1998. 26.—P. 322—324.
37. *Smith D. E., Zuber M. T.* Topography of the lunar south polar region: implications for the location and distribution of permanently shaded areas // Geophys. Res. Lett.—1997.—24.—P. 2183.
38. *Toulmonde M.* The diameter of the Sun over the past three centuries // Astron. and Astrophys.—1997.—325.—P. 1174—1178.
39. *Watts C. B.* The marginal zone of the Moon // Astron. Pap.—1963.—17.—P. 1—951.

Надійшла до редакції 05.05.03