

УДК 521.852

**В. В. Клещонок**

Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченка  
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

### **Учет дифракционных явлений при обработке телевизионных наблюдений покрытий звезд Луной**

*Проанализировано влияние дифракционных явлений на определение моментов покрытий звезд Луной из телевизионных наблюдений. Показано, что учет необходимых поправок приводит к существенному повышению точности определения моментов покрытий по фотометрическим кривым. Для ярких звезд точность телевизионных наблюдений может достигать 3 мс.*

*ВРАХУВАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЯВИЩ ПРИ ОБРОБЦІ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОКРИТТІВ ЗІР МІСЯЦЕМ, Клещонок В. В. — Проаналізовано вплив дифракційних явищ на визначення моментів покриттів зір Місяцем за телевізійними спостереженнями. Показано, що врахування необхідних поправок призводить до істотного покращення точності визначення моментів покриттів за фотометричними кривими. Для яскравих зір похибка телевізійних спостережень може досягати 3 мс.*

*TAKING INTO ACCOUNT DIFFRACTION PHENOMENA IN PROCESSING OF OBSERVATIONS OF STAR OCCULTATIONS BY THE MOON WITH TELEVISION SYSTEMS, by Kleshchonok V. V. — The influence of diffraction phenomena on the determination of moments of star occultations by the Moon from television observations was analysed. It is shown that taking into account the necessary corrections results in an essential increase of the accuracy of occultation moment determination from photometric curves. For bright stars, the accuracy can reach 3 ms under the real signal-to-noise ratio of television observations.*

## ВВЕДЕНИЕ

В 2003 г. Астрономической обсерватории Киевского университета были начаты наблюдения покрытий звезд Луной с телевизионным комплексом «Спалах» [4, 5]. За весь период наблюдений на нем было зафиксировано более 150 явлений покрытий. Оборудование телевизионного комплекса и программное обеспечение для обработки наблюдений покрытий позволяет получить фотометрическую кривую звезды вблизи момента покрытия. Такая возможность была предусмотрена для более надежного определения момента покрытия для изображений слабых звезд с малым отношением сигнал/шум. Время экспонирования полного кадра в телевизионном стандарте составляет 40 мс. Это превышает обычную продолжительность дифракционных явлений при наблюдениях покрытий звезд Луной. Поэтому дифракция обычно не учитывается при определении моментов покрытия. Однако некоторые наблюдаемые кривые блеска звезд с большими позиционными углами относительно направления на северный полюс Луны указывают на наличие дифракционных эффектов [3].

Кроме того, для некоторых фотометрических кривых покрытия наблюдается эффект ступеньки, когда яркость звезды уменьшается к фоновому значению не мгновенно, а имеет одно промежуточное значение. Такое явление должно наблюдаться при наступлении момента покрытия во время экспозиции кадра с промежуточной интенсивностью. В этом случае эффективная экспозиция изображения покрываемой звезды уменьшается. При этом также нужно учитывать дифракционные явления, чтобы точно оценить на какую долю длительности кадра приходится момент покрытия.

В данной работе рассматривается влияние дифракционных явлений на фотометрическую кривую покрытия звезды Луной при наблюдениях с помощью телевизионных систем.

## НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

На фотометрической кривой покрытия звезды HD 105639 (SAO 119245) 1 мая 2004 г. (рис. 1), которая получена с помощью телевизионной установки «Спалах», видна ступенька. Штрих-пунктирные линии отмечают среднюю интенсивность сигнала до и после по-

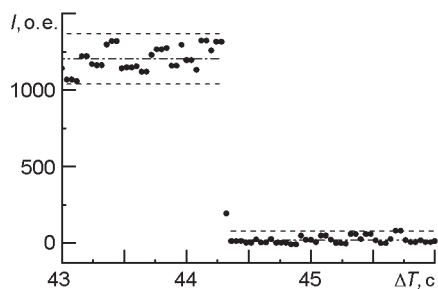


Рис. 1. Фотометрическая кривая покрытия звезды SAO 119245 (HD 105639) 1 мая 2004 г.

крытия, пунктирная линия отвечает допустимому интервалу  $\pm 2.5$ . Видно, что интенсивность изображения звезды уменьшается к нулю не мгновенно, а имеет одно промежуточное значение. Всего было зарегистрировано шесть таких случаев. Теоретически возможно, что такая фотометрическая кривая формируется очень тесными двойными системами, которые находятся на расстоянии порядка  $0.02$ . Однако сложно объяснить, почему двойные системы преимущественно имеют именно такое расстояние между компонентами. Поэтому мы считаем, что последнее изображение со звездой имело меньшее время экспозиции, чем предыдущие изображения, так как покрытие состоялось во время экспозиции кадра. В первом приближении, которое применялось раньше при обработке наблюдений, можно использовать линейную поправку  $t$  к времени  $T_d$  начала кадра со «ступенькой»:

$$t = \frac{I_d - I_s}{I_s - I_f},$$

где  $I_s$  и  $I_d$  — соответственно интенсивности изображения звезды перед покрытием и на кадре с промежуточной интенсивностью,  $I_f$  — уровень фона, — время экспозиции одного кадра.

Для точной оценки поправки необходимо учитывать дифракционные явления, которые возникают во время покрытия.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

При расчетах дифракционной картинке во время покрытия звезды считается, что край Луны ровный, и потому можно использовать теорию дифракции Френеля на плоском экране. Из эфемеридных расчетов покрытия звезды известны параметры видимого движения Луны и позиционный угол покрытия. Обстоятельства покрытия изображены на рис. 2. Здесь  $S$  — звезда, которая покрывается, прямая  $SK$  — положение края Луны в момент покрытия (ее позиционный угол  $T$ ). Луна движется со скоростью  $V$  в направлении с позиционным углом  $M$ .

Если не учитывать профиль краевой зоны и кривизны лунного диска в точке покрытия, то  $T = P - 90^\circ$ , где  $P$  — эфемеридный позиционный угол покрытия. Тогда скорость края Луны относительно звезды  $V_s$  определяется скоростью  $V$  и углом проекции  $\alpha = P - M$  между направлением движения Луны и направлением перемещения края, который заслоняет звезду.

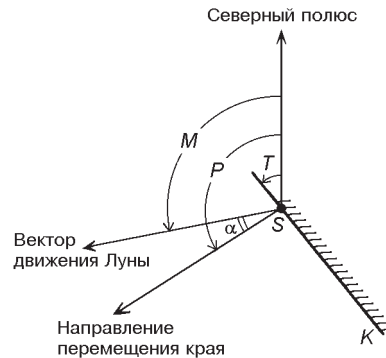


Рис. 2. Обстоятельства покрытия звезды Луной

Теория дифракции Френеля дает такое выражение для кривой блеска объекта во время покрытия [2, 6]:

$$I(t) = \int_{R_1}^R dl \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda F(w) (\lambda) O(l) E(\lambda) T(\lambda) d I_b,$$

где  $T(\lambda)$  — временной отклик приемника в пределах его временного разрешения  $\Delta t$ ,  $E(\lambda)$  — распределение спектральной яркости в изображении звезды для системы звезда + приемник + фильтр + телескоп + атмосфера в пределах полосы пропускания  $\lambda_1 - \lambda_2$ ,  $O(l)$  — апертура телескопа вдоль направления движения Луны,  $R$  — радиус зеркала телескопа,  $(\lambda)$  — профиль яркости источника излучения вдоль направления движения Луны (стрип-распределение),  $I_b$  — постоянная аддитивная величина, которая задается яркостью фона,  $F(w)$  — распределение энергии в дифракционной картинке от точечного монохроматического источника, которое определяется через интегралы Френеля  $S(w)$  и  $C(w)$  для безразмерной величины  $w$ :

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

$$S(w) = \int_0^w \sin \frac{t^2}{2} dt, \quad C(w) = \int_0^w \cos \frac{t^2}{2} dt,$$

$$w = \sqrt{\frac{2}{D}} x, \quad w = \sqrt{\frac{2D}{\lambda}} x, \quad x = V_s(t - t_0).$$

В качестве момента  $t_0$  взят момент, когда центр диска звезды, центр апертуры телескопа и край Луны находятся на одной прямой.

Спектральное распределение  $E(\lambda)$  определяется произведением

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

где  $E_s(\lambda)$  — распределение энергии в спектре звезды,  $Q(\lambda)$  — спектральная чувствительность приемника,  $P_1(\lambda)$ ,  $P_2(\lambda)$ ,  $P_3(\lambda)$  — спектральная кривая пропускания фильтров, атмосферы и телескопа соответственно.

## РАСЧЕТЫ

Для телевизионных наблюдений нами использовались малые телескопы (с диаметром до 0.5 м), тогда как характерная ширина дифракционных полос в видимом диапазоне у поверхности Земли около 14 м. Поэтому с достаточной для практики точностью можно не делать интегрирования по апертуре, а считать площадь зеркала постоянным множителем. Конечный размер звезды также влияет на дифракционную картину. Однако расчеты показывают, что изменение ве-

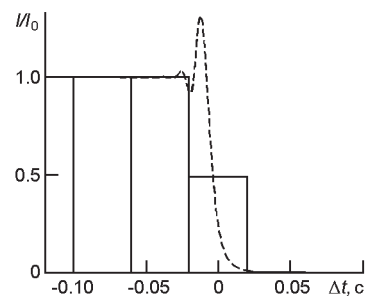
личины промежуточного сигнала за счет учета конечного диаметра звезды до величины видимого диаметра  $0.01$  и при углах проекции  $\theta = 60^\circ$  не превышает  $10\%$  от первоначального уровня интенсивности. Очевидно, количество регистраций покрытий с такими параметрами должно быть несравненно больше. К тому же, при таких и больших значениях диаметра в регистрируемой фотометрической кривой покрытия уже начинают проявляться дополнительные значения с промежуточной интенсивностью. Все такие значения с промежуточной интенсивностью формируют хорошо заметный переходной процесс. На практике при наших наблюдениях наблюдалось только скачкообразное изменение яркости. Поэтому в наших расчетах для определения момента покрытия с помощью телевизионных систем можно считать звезды точечными источниками. С учетом изложенных выше рассуждений интегрирование проводилось только по спектру и времени продолжительности одного телевизионного кадра  $40$  мс.

Для интегрирования по спектру использовались данные спектральной чувствительности для телевизионного приемника типа ICX248AL [www.datasheetcatalog.com]. Данные о распределении энергии в спектрах звезд, пропускания фильтров, телескопа и стандартной атмосферы брались из справочника [1]. Все расчеты делались для среднего расстояния и средней скорости Луны. При вычислениях варьировался угол проекции скорости Луны в диапазоне от  $0$  до  $80^\circ$ . При угле проекции  $80^\circ$  временного разрешения телевизионной системы уже достаточно, чтобы увидеть дифракционную картинку. Начиная с этого значения угла нужно точно рассчитывать фотометрическую кривую, чтобы определить время покрытия.

В результате расчетов получается сначала дифракционная картинка в линейной шкале. После этого она интегрировалась с разными линейными шкалами, которые отвечают перемещению края Луны за время продолжительности одного кадра при разных углах проекции. Кроме этого для последнего интегрирования делался разный сдвиг интервалов интегрирования относительно точки с координатой  $x = 0$ . Тем самым моделировались случаи с разным сдвигом момента покрытия по отношению к началу экспозиции кадра.

На рис. 3 приведен пример такого расчета. Ширина полос отвечает границам интегрирования продолжительностью в один телевизионный кадр. Видно, что фотометрическая кривая имеет характерный вид

Рис. 3. Расчеты дифракционной картинки (пунктирная линия) и интенсивности изображения звезды на телевизионных кадрах (сплошная линия) во временной шкале для звезды спектрального класса G0 и угла проекции  $0^\circ$ . Момент покрытия попадает на середину кадра



**Таблица 1.** Зависимость интенсивности переходного отсчета от смещения  $t$  момента покрытия от начала кадра и угла проекции направления движения Луны для звезды спектрального класса G0 в интегральном свете

$t$ , мс	Угол проекции направления движения Луны								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.14
4	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.12	0.16
8	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.18
12	0.27	0.27	0.26	0.25	0.24	0.22	0.20	0.20	0.21
16	0.39	0.39	0.39	0.38	0.36	0.33	0.29	0.25	0.24
20	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.46	0.4	0.32	0.27
24	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.52	0.41	0.31
28	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.64	0.51	0.35
32	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.75	0.75	0.62	0.40
36	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.84	0.83	0.74	0.45

со ступенькой. Результаты расчетов накоплены в виде набора таблиц, где для звезды определенного спектрального класса приведены относительные интенсивности переходного сигнала в зависимости от момента покрытия от начала кадра и угла проекции скорости Луны (см. табл. 1). Все расчеты выполнены для стандартной продолжительности телевизионного кадра в 40 мс. Использовались фотометрические полосы  $R$  и  $I$ , обеспечивающие малый уровень фонового рассеянного света около Луны, и интегральная система (без фильтра), которая позволяет реализовать наибольшую чувствительность.

Из сравнения данных разных таблиц можно сделать вывод, что для углов проекции до  $50^\circ$  зависимости от фильтра и спектрального класса звезды почти нет. Приближенная формула, которая не учитывает точную дифракционную теорию, хорошо работает в диапазоне углов  $0-40^\circ$ . Во всем посчитанном диапазоне углов есть разница между интенсивностями переходного отсчета для разных фильтров, хотя практически отсутствует зависимость от спектрального класса звезды. Поэтому можно построить общую зависимость для каждого типа фильтра и пользоваться ею для нахождения поправки для реальных телевизионных наблюдений для всех наблюдаемых звезд. Графики таких поправок приведены на рис. 4.

В реальных условиях наблюдений фотометрическая кривая покрытия получается со значительными погрешностями. Это связано со статистическими шумами измеряемого сигнала и шумами фотоприемника. Наличие погрешностей будет влиять на точность определения интенсивности переходного отсчета, а значит и на точность определения момента покрытия. Будем считать фотоприемник линейной системой, а шумы в изображении аддитивными и распределенными по нормальному закону. Тогда можно записать для относительной интенсивности промежуточного отсчета  $i$ :

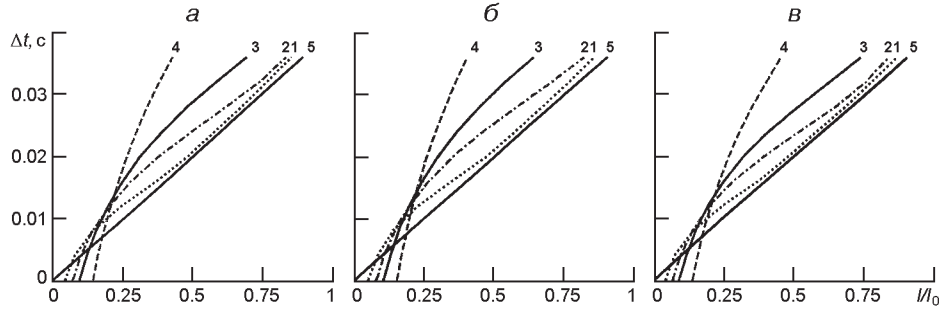


Рис. 4. Значение поправки  $\Delta t$  к времени покрытия от начала телевизионного кадра в зависимости от промежуточной интенсивности сигнала: а — для полосы R, б — для полосы I, в — в интегральном свете для углов проекции скорости 0—50° (кривая 1), 60° (2), 70° (3), 80° (4) и рассчитанная по приближенной формуле (кривая 5)

$$i = \frac{I_t}{I_s} \frac{I_f}{I_f}, \quad (1)$$

где  $I_s, I_f, I_t$  — интенсивности сигнала в изображении звезды к покрытию, фону и промежуточному отсчету соответственно. Погрешность  $i$  относительной интенсивности промежуточного отсчета равна

$$i = \frac{I_s(I_t - I_f) - I_f(I_s - I_t) + I_t(I_s - I_f)}{(I_s - I_f)^2}, \quad (2)$$

где  $I_s, I_f, I_t$  — погрешности интенсивности сигнала в изображении звезды к покрытию, фону и промежуточному отсчету соответственно. Для определения погрешности с помощью соотношения (2), кроме погрешностей интенсивности сигнала в изображении звезды и фона, которые можно определить из фотометрической кривой, нужно знать погрешность промежуточного отсчета.

Формулу (1) можно переписать через отношение сигнал/шум для звезды ( $s_s$ ) и промежуточного отсчета ( $s_t$ ), а также отношение  $n$  интенсивности шумов для звезды и фона:

$$i = \frac{s_s}{\sqrt{n_s - 1}} \frac{s_s(1 - i)}{n\sqrt{n_f - 1}} = s_t i, \quad (3)$$

где  $n_s$  и  $n_f$  — количество точек при определении интенсивности сигнала в изображении звезды и фона.

Для оценки точности воспользуемся зависимостями отношения сигнал/шум и отношением уровней шумов в изображении звезды и фона после момента покрытия от звездной величины  $m$  (рис. 5). Они получены на основе анализа фотометрических кривых покрытий из каталога [3]. Их значение имеет существенный разброс и зависит в значительной мере от состояния атмосферы, фазы Луны и позицион-

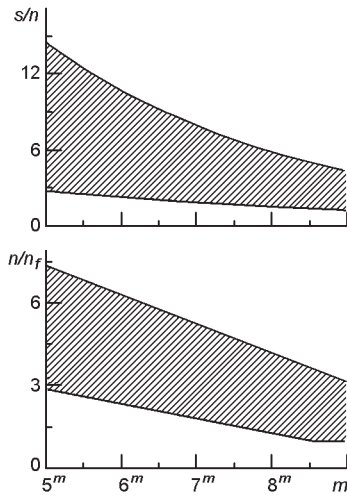


Рис. 5. Зависимости от звездной величины отношения сигнал/шум звезды (а) и отношения уровней шумов в изображении звезды и фона (б)

ного угла покрытия. Поэтому на графиках приведены зоны, которые охватывают все полученные значения.

Зону значений на рис. 4, а можно представить как семейство кривых типа  $a \exp(-bm)$ , де  $a_{\min} = 7.5$ ,  $a_{\max} = 65$ ,  $b_{\min} = 0.2$ ,  $b_{\max} = 0.3$  — соответственно минимальные и максимальные значения параметров для зоны рис. 5, а. Будем считать, что промежуточные значения интенсивности лежит на той же кривой, что и для значения интенсивности изображения звезды до покрытия.

Зона значений отношений уровней шумов в изображении звезды и фона ограничена прямыми линиями. Их можно найти из соотношений

$$n_{\max} = 12.6 - 1.05m, \quad n_{\min} = \max(5.5 - 0.53m, 1).$$

Воспользуемся методом статистических испытаний. Тогда для  $k$ -го испытания

$$\begin{aligned} a_k &= a_{\min} + R_k (a_{\max} - a_{\min}), \\ b_k &= b_{\min} + R_k (b_{\max} - b_{\min}), \\ n_k &= n_{\min} + R_k (n_{\max} - n_{\min}), \end{aligned}$$

где  $R_k, R_k$  — случайные величины с равномерным распределением в диапазоне 0—1. Это дает нам возможность оценить дисперсию для величин, которые входят в формулу (1). Далее по известной дисперсии рассчитывается  $k$ -я реализация относительной интенсивности промежуточного сигнала

$$i_k = \frac{(I_t - N_k) (I_f - N_k)}{(I_s - N_k) (I_f - N_k)}, \quad (4)$$

где  $N_k, N_k, N_k$  — независимые случайные величины, которые распределены по нормальному закону со средним значением 0 и имеют дисперсии сигнала от звезды, фона и промежуточного изображения соответственно. По этой реализации рассчитывается время покрытия от начала кадра, которой сравнивается с модельным значением.

Результаты расчетов по данной схеме точности определения времени покрытия за фотометрической кривой представлены в табл. 2. Все расчеты были выполнены для наблюдений без фильтров и звезды спектрального класса G0. Поскольку зависимость от спектрального класса и фотометрической системы, в которой выполняются наблю-



**Таблица 2.** Средняя квадратичная погрешность в миллисекундах определения момента покрытия от начала кадра  $t$  по фотометрической кривой для звезд спектрального класса G0 с интегральным блеском  $5^m$ ,  $7.5^m$  и  $10^m$

$t$ , мс	Угол проекции направления движения Луны								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
	$5^m$								
0	8	9	8	8	8	8	7	7	7
4	4	4	5	5	4	5	6	5	7
8	3	3	3	3	3	3	5	4	7
12	3	3	3	3	3	3	3	4	7
16	3	3	3	3	3	3	3	5	7
20	3	4	3	4	3	4	3	5	7
24	5	5	6	5	5	4	3	4	7
28	9	7	7	7	7	7	5	4	7
32	13	13	12	12	11	12	11	8	6
36	18	18	18	18	17	16	16	11	7
	$7.5^m$								
0	15	15	15	14	13	13	13	13	13
4	11	10	11	11	9	11	11	11	13
8	8	7	7	7	8	9	10	10	13
12	7	7	6	6	5	7	9	8	13
16	7	7	6	5	6	6	6	9	13
20	8	7	7	8	7	7	7	8	13
24	11	10	10	10	10	10	10	8	13
28	15	15	15	14	14	15	14	10	13
32	19	20	20	20	19	19	18	13	12
36	24	23	22	22	22	22	22	17	13
	$10^m$								
0	20	20	20	20	20	20	20	20	21
4	19	18	19	19	18	19	19	19	21
8	16	16	17	17	16	17	18	19	21
12	14	15	14	14	14	16	16	19	23
16	15	16	15	15	15	14	16	18	23
20	18	18	19	18	16	16	15	19	23
24	21	21	22	22	21	22	20	19	22
28	24	26	25	25	25	24	23	21	22
32	28	28	28	28	28	27	25	26	23
36	28	29	29	29	28	28	28	26	23

дение, очень слабая, то подобные результаты должны быть и для звезд разных спектральных классов и других фильтров.

Ошибка определения момента покрытия по фотометрической кривой имеет зависимость от смещения времени покрытия от начала кадра и от угла проекции скорости Луны. Зависимость от времени смещения имеет характерный вид, когда для малых значений смещения погрешность слегка уменьшается с увеличением смещения, а потом быстро увеличивается. Это происходит в соответствии с формулой (2), когда сначала сильнее влияет погрешность фона. С увеличением уровня промежуточного отсчета ее влияние уменьшается. Дальше увеличивается как величина погрешности промежуточного отсчета, так и вклад погрешности определения первоначального уров-

ня интенсивности звезды, который приводит к резкому увеличению величины погрешности.

Анализ таблиц значений для погрешности моментов покрытий показывает вполне понятную зависимость точности от яркости звезды, но даже для слабых звезд учет фотометрической поправки к времени покрытия является оправданным. Для ярких звезд точность определения моментов покрытий с учетом всех необходимых поправок может достигать 3 мс. Это дает принципиальную возможность существенно увеличить точность определения моментов покрытий по телевизионным кадрам. Для реализации этой возможности необходима система, которая позволяет получать привязку начала телевизионного кадра с точностью на уровне 1 мс.

## ВЫВОДЫ

1. Учет дифракционных явлений при наблюдении покрытий звезд Луной может улучшить точность определения моментов покрытия в случае, когда фотометрическая кривая покрытия имеет кадр с переходной интенсивностью. Точность определения по фотометрической кривой моментов покрытий может достигать 3 мс для ярких звезд.

2. Численные расчеты, которые используют теорию дифракции, показывают, что на величину поправки к времени покрытия спектральный класс звезды практически не имеет влияния.

3. Величину поправки к времени покрытия звезды для диапазона углов проекции скорости Луны  $0\text{--}50^\circ$  можно использовать приближенную линейную формулу, а для углов больше  $50^\circ$  нужно учитывать соответствующие поправки для каждого значения угла и типа фильтра, которые рассчитываются с учетом дифракционных явлений.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977.—448 с.
2. Гончарский А. В., Романов С. Ю., Черепашук А. М. Конечнопараметрические обратные задачи астрофизики. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.—192 с.
3. Клещонков В. В., Буромский Н. И., Хатько И. В. Киевская электронная база данных телевизионных наблюдений покрытий звезд Луной // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—24, № 2.—С. 158—163.
4. Kleshchonok V. V. The “Spalakh” astronomical television system // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2005.—№ 5.—P. 409—412.
5. Kleshchonok V. V., Buromsky M. I. Observations of stars occultations by the Moon with the “Spalakh” television system // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2005.—№ 5.—P. 405—408.
6. 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.

Поступила в редакцию 07.07.09